

Objektivierung von Kooperationsbereitschaft am Beispiel eines Spurwechsels im
Niedriggeschwindigkeitsbereich

Von der Fakultät für Lebenswissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades einer
Doktorin der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)
genehmigte
D i s s e r t a t i o n

von Nina Karoline Kauffmann
aus München

1. Referent: Professor Dr. Mark Vollrath
2. Referent: Professor Dr. Josef F. Krems
eingereicht am: 24.09.2018
mündliche Prüfung (Disputation) am: 04.04.2019
Druckjahr 2019

Vorveröffentlichungen der Dissertation

Teilergebnisse aus dieser Arbeit wurden mit Genehmigung der Fakultät für Lebenswissenschaften, vertreten durch den Mentor der Arbeit, in folgenden Beiträgen vorab veröffentlicht:

Tagungsbeiträge

Kauffmann, N. , Winkler, F. & Vollrath, M. (2017, 15. Februar). Kommunikation von Kooperationsbereitschaft beim hochautomatisierten Fahren am Beispiel von Fahrstreifenwechsel. Deutschen Gesellschaft für Psychologie (dgps), Braunschweig.

Kauffmann, N. (2017): Objektivierung von Kooperationsbereitschaft am Beispiel einer Fahrstreifenwechselsituation im Niedriggeschwindigkeitsbereich. Dialogtag, München.

Kauffmann, N. (2017, 19.-21. September): Außenwahrnehmung von Fahrstreifenwechselankündigungen. 11. Doktorandenworkshop der Fachgruppe Verkehrspsychologie, Braunschweig.

Kauffmann, N., Winkler F. & Vollrath, M. (2017, 22. Oktober). Entwicklung einer (hoch)automatisierten kooperativen Spurwechselstrategie im dichten Verkehr auf der Autobahn. TÜV SÜD Fahrassistentenztagung, Garching.

Kauffmann, N., Winkler F.& Vollrath, M. (2017, 22. Oktober). Entwicklung einer kooperativen Bremsstrategie im dichten Verkehr auf der Autobahn.VDI: Der Fahrer im 21. Jahrhundert, Braunschweig.

Konferenzbeiträge

Kauffmann, N., Naujoks, F., Winkler, F., & Kunde, W. (2018). Learning the “Language” of Road Users How Shall a Self-driving Car Convey Its Intention to Cooperate to Other Human Drivers? *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 592, 53–63. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60366-7_6

Kauffmann, N., Winkler, F., & Vollrath, M. (2018). What makes an automated vehicle a good driver?: Exploring lane change announcements in dense traffic situations. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings* (Vol. 2018–April). <https://doi.org/10.1145/3173574.3173742>

Journalartikel

Kauffmann, N., Winkler, F., Naujoks, F., & Vollrath, M. (2018). “What Makes a Cooperative Driver?” Identifying parameters of implicit and explicit forms of communication in a lane change scenario. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 58, 1031–1042. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.07.019>

Zusammenfassung

Die zunehmende Automatisierung der Fahrzeuge verspricht viele Vorteile, wie die Reduktion von Emissionen, einen verbesserten Verkehrsfluss und einen erhöhten Komfort. Die Erwartungen der Bevölkerung an das automatisierte Fahren sind hoch. Demgegenüber stehen dennoch Sorgen und Ängste. Eine Herausforderung, die gerade in der Übergangsphase zum autonomen Fahren im Vordergrund steht, ist die Kommunikation im Mischverkehr zwischen menschlichen und automatisierten Fahrzeugen. Für diese Herausforderung muss eine Lösung gefunden werden, damit das automatisierte Fahrzeug von den umgebenden Verkehrsteilnehmern verstanden und akzeptiert wird. Die Frage über den Umgang mit derartigen Situationen wurde bereits von mehreren Autoren aufgeworfen. Lösungsvorschläge in der Entwicklung von Fahrstrategien gehen in Richtung des kooperativen Fahrens, beleuchten dabei aber die psychologische Komponente zu wenig, zum einen die informelle aktive Kommunikation zwischen Menschen, zum anderen auch die Attribution während der Interaktion.

Die vorliegende Arbeit liefert hierfür einen interdisziplinären Ansatz. Ziel ist es Handlungsempfehlungen für die Gestaltung einer verhaltensbasierten Fahrstrategie basierend auf psychologischen Erkenntnissen und Theorien geben. Die Basis hierfür lieferten Theorien wie die Signalentdeckungstheorie (Green & Swets, 1966) oder das Modell von Grice (1975). Ein Anwendungsbeispiel, das zu den komplexesten Szenarien auf der Autobahn gehört und ein erhöhtes Maß an koordinierter Abstimmung erfordert ist ein Fahrstreifenwechselszenario im Niedriggeschwindigkeitsbereich auf der Autobahn. Dieser wurde aus Einscherer- und Folgefaherperspektive in drei Studien im Fahrsimulator beleuchtet. Im ersten Schritt wurde untersucht wie Menschen in einer derartigen Situation miteinander kommunizieren und wie dies jeweils aus Einscherer- und Folgefaherperspektive wahrgenommen wurde. Dabei wurde genauer analysiert, was in diesem Kontext eine eindeutige und kooperative Kommunikation ausmacht und wie dies anhand von Fahrparametern objektiviert werden kann.

In einem zweiten Schritt wurden die Ergebnisse für den betrachteten Anwendungsfall in Form eines neuen Brems- und Spurwechselalgorithmus in die bestehende Verkehrssimulation integriert und mit den Ursprungsstrategien im Fahrsimulator verglichen. Diesmal lag der Fokus auf der Interaktion zwischen menschlichen und autonomen Fahrzeugen. Es zeigte sich, dass die neu entwickelten Strategien besser bewertet wurden. Die Studien unterstreichen die Wichtigkeit und Notwendigkeit psychologische Aspekte bei der Entwicklung von Algorithmen mit zu beachten, um eine höhere Verkehrssicherheit und Akzeptanz in der Bevölkerung zu schaffen.

Abstract

The increasing automation of vehicles promises many advantages, such as reduction of emissions, improved traffic flow and increased comfort. The public's expectations of automated driving are high. However, concerns and fears still remain. One challenge that is particularly important in the transition phase to autonomous driving is communication in mixed traffic between human and automated vehicles. A solution must be found to this challenge so that the automated vehicle is understood and accepted by the surrounding road users. The question of how to deal with such situations has already been raised by several authors. Suggestions for solutions in the development of driving strategies go in the direction of cooperative driving, but do not shed enough light on the psychological component, concerning the informal active communication between people, but also the attribution during the interaction.

This paper provides an interdisciplinary approach. The aim is to give recommendations for action for the design of a behavior oriented driving strategy based on psychological findings and theories. The basis for this was provided by theories such as the signal discovery theory (Green & Swets, 1966) or the Grice model (1975). One use case that is one of the most complex scenarios on the highway and requires an increased degree of coordinated alignment between drivers, is a lane change scenario in a low speed range. This was examined in three studies in the driving simulator from a merging and car following perspective. The first step was to investigate how people communicate with each other in such a situation and how this was perceived from the perspective of the cut in vehicle and the lag driver. In this context, it was analyzed in more detail what constitutes unambiguous and cooperative communication and how this can be objectified on the basis of driving parameters.

In a second step, the results for the application in question were integrated into the existing traffic simulation in the form of a new brake and lane change algorithm and compared with the original strategies in the driving simulator. This time the focus was on the interaction between human and autonomous vehicles. It turned out that the newly developed strategies were better evaluated. These studies underline the importance and necessity to consider psychological aspects in the development of algorithms in order to create higher traffic safety and acceptance in the population.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	ix
Danksagung.....	xii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielstellung.....	4
1.2 Aufbau der Arbeit	5
I Theoretischer Hintergrund.....	8
2 Stand der Forschung	8
2.1 Kooperatives Verhalten.....	8
2.1.1 Begriffserklärung und Bedeutung.....	8
2.1.2 Einflussfaktoren auf kooperatives Verhalten.....	13
2.1.3 Auswirkung kooperativen Verhaltens im Straßenverkehr.....	15
2.2 Eindeutiges Fahrverhalten.....	16
2.3 Kommunikation	19
2.3.1 Kommunikation: Bedeutung und Modelle	19
2.3.2 Kommunikation im Straßenverkehr.....	21
2.4 Fahrstreifenwechselsituation.....	25
2.4.1 Definition Fahrstreifenwechsel.....	25
2.4.2 Rechtliche Grundlagen	26
2.4.3 Gründe für Fahrstreifenwechsel.....	26
2.4.4 Phasen des Fahrstreifenwechsels	27
2.4.5 Parameter im Fahrstreifenwechselszenario	28
2.5 Objektprädiktion – Indikatoren in einer Fahrstreifenwechselsituation.....	38
2.6 Verwandte Literatur	40
2.7 Zusammenfassung und Fazit.....	41
3 Stand der Technik	43
3.1 Einordnung der Fahrerassistenzsysteme	43
3.2 Bestehende Spurwechselassistenten	44
3.3 Bestehende Abstandsregeltempomaten.....	45
3.4 Gap Acceptance und Fahrzeugfolgemodelle	47
3.4.1 Gap Acceptance Modelle.....	47
3.4.2 Folgemodelle	49
3.4.3 Grenzen der Modelle	51
4 Zusammenfassung der Literatur	52
II Forschungsfragen.....	54
5 Forschungsfragen und Vorgehen	54
Analyse menschlichen Kooperationsverhaltens	55
Analyse der Übertragbarkeit auf die Interaktion zwischen Fahrern und automatisierten Fahrzeugen	56
6 Untersuchung der Außenwirkung des Folgefahrers in einer Fahrstreifenwechselsituation.....	56
6.1 Einleitung	56
6.2 Untersuchungsmethodik.....	59
6.2.1 Versuchsdesign	59
6.2.2 Fahrscenario.....	60
6.2.3 Darstellung der unabhängigen und abhängigen Variablen	60
6.2.4 Fahrsimulator	63
6.2.5 Durchführung.....	64
6.2.6 Stichprobe	65
6.3 Ergebnisse	65

6.3.1	Subjektive Datenbasis	65
6.3.2	Fahrdaten	69
6.4	Diskussion	76
7	Untersuchung der Außenwirkung des Einscherers in einer Fahrstreifenwechselsituation I	78
7.1	Einleitung	78
	Hauptstudie.....	79
7.2	Untersuchungsmethodik.....	79
7.2.1	Versuchsdesign	79
7.2.2	Fahrscenario	80
7.2.3	Darstellung der unabhängigen und abhängigen Variablen	81
7.2.4	Fahr Simulator	83
7.2.5	Durchführung.....	83
7.2.6	Stichprobe	84
7.3	Ergebnisse	84
7.3.1	Subjektive Datenbasis	84
7.3.2	Fahrdaten	88
	Weiterführende Studie.....	91
7.4	Untersuchungsmethodik.....	92
7.4.1	Versuchsdesign	92
7.5	Ergebnisse subjektive Datenbasis	93
7.6	Gesamtdiskussion.....	95
8	Untersuchung der Außenwirkung des Einscherers in einer Fahrstreifenwechselsituation II.....	97
8.1	Einleitung	97
8.2	Untersuchungsmethodik.....	99
8.2.1	Versuchsdesign	99
8.2.2	Fahr Simulator	102
8.2.3	Fahrscenario	103
8.2.4	Durchführung.....	104
8.2.5	Stichprobe	104
8.3	Ergebnisse	105
8.3.1	Subjektive Datenbasis	105
8.3.2	Fahrdaten	109
8.4	Diskussion.....	111
9	Zusammenfassung	114
10	Evaluation der kooperativen Fahrstrategie mit den herkömmlichen Fahrstrategien	115
10.1	Einleitung	115
	Evaluationsstudie Spurwechselstrategie	116
10.2	Untersuchungsmethodik.....	116
10.2.1	Versuchsdesign	116
10.2.2	Fahr Simulator	118
10.2.3	Fahrscenario	120
10.2.4	Durchführung.....	120
10.2.5	Stichprobe	121
10.2.6	Ergebnisse.....	121
10.2.7	Diskussion.....	123
	Evaluationsstudie Bremsstrategie.....	124
10.3	Untersuchungsmethodik.....	124
10.3.1	Versuchsdesign	124

10.3.2	Fahrsimulator	126
10.3.3	Fahrszenario	126
10.3.4	Durchführung	127
10.3.5	Stichprobe	127
10.3.6	Ergebnisse	127
10.4	Diskussion	128
10.5	Gesamtdiskussion der automatisierten Strategien	129
11	Exkurs: Entwicklung eines Machine Learning (ML) Algorithmus	130
11.1	Einleitung	130
11.2	Einführung in die Methode des Maschinellen Lernens (ML)	131
11.3	Vorgehensweise	133
11.3.1	Datensichtung	134
11.3.2	Datenvorbereitung	134
11.3.3	Datenbeschriftung	134
11.3.4	Modellauswahl	136
11.3.5	Merkmalsselektion	136
11.3.6	Trainieren des Modells	137
11.3.7	Ergebnisanalyse	138
11.4	Diskussion	140
12	Zusammenfassende Diskussion	141
13	Ausblick	149
14	Literaturverzeichnis	154
Anhang	163
Lebenslauf	185

Abkürzungsverzeichnis

Δv	Umfang der Geschwindigkeitsreduktion
ACC	Adaptive Cruise Control
AUC	Area Under Curve
AV	Abhängige Variable
BL	Blickverhalten
DLC	Discretionary lane change
E	Einscherer
EGO	Fahrzeug des Probanden
ERS	Enhanced Reality Strip
F	Folgefahrer
FAS	Fahrerassistenzsysteme
FC	Forced merging
FN	False negative
FP	False positive
GG	Greenhouse Geisser
GHR	Gazis–Herman–Rothery
HMI	Human Machine Interface
ISO	International Organization for Standardization
KU- Skala	Kategorieunterteilungsskala
ML	Maschinelles Lernen
MLC	Mandatory lane change
NDS	Naturalistic Driving Study
P	Proband
SAE	Society of Automotive Engineers
SEEV-Modell	Saliency - Effort - Expectancy-Value-Model
StVO	Straßenverkehrsordnung
t	Reaktionszeit
THW	Time Headway
TLC	Time to Line Crossing
TN	True Negative
TP	True Positive
TRM	Traffic Modelling
TTA	Time to Arrival

TTC Time to Collision
 UV Unabhängige Variable
 V2V Vehicle to vehicle, Vehicle to Vehicle
 VDA Verband der Automobilindustrie
 V Vorderfahrzeug
 VL..... Versuchsleiter
 WIVWWürzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH

Für meine Eltern

Danksagung

“The hardest problems associated with an Automated Highway System (AHS) ... are ‘soft’; that is, there are human factors issues of safety, usability, and acceptance, as well as institutional issues. These are problems that are many times more difficult to overcome and must be overcome, largely, in parallel with the traditionally ‘hard’ technological issues”

(Neale & Dingus, 1998, S.111)

Wenn mir jemand früher gesagt hätte ich werde im Bereich des autonomen Fahrens in Ingenieurspsychologie promovieren, hätte ich es wahrscheinlich nicht geglaubt. Zum einen, weil ich mir früher nie vorstellen konnte, dass wir an den Punkt kommen, autonome Fahrzeuge zu entwickeln und zum anderen, weil ich nicht wusste wie Ingenieurwesen und Psychologie überhaupt zusammenhängen. Jetzt weiß ich es...

Gerade zu Beginn und im Laufe der Promotion wurde mir bewusst, dass die Miteinbeziehung von psychologischem Know-How zu den wichtigsten Faktoren gehört, um in der Transitionsphase vom manuellen zum autonomen Fahren sichere Funktionen zu entwickeln, die auch von Menschen akzeptiert werden. Ich freue mich, dass ich zu diesem Thema einen Beitrag leisten durfte. Ich möchte mich bei vielen Menschen bedanken, die dazu beigetragen haben, dass ich so weit gekommen bin und nicht den Mut verloren habe.

Mein größter Dank gilt **Prof. Dr. Mark Vollrath**. Mit seiner positiven, bestärkenden Art und dem Glauben an mich und meine Arbeit war die Dissertation überhaupt möglich. Zum anderen danke ich Herrn **Prof. Dr. Krems**, der sich bereit erklärt hat Zweitprüfer in meiner Dissertation zu sein. Während meiner Dissertation wurde ich fachlich und persönlich von vielen Menschen unterstützt. Vielen Dank an **Dr. Franz Winkler**, den besten Betreuer von BMW Seite, den man sich wünschen kann. Vielen Dank an **Dr. Frederik Naujoks**, der mir gerade in der Anfangszeit eine Orientierung gegeben hatte. An dieser Stelle auch vielen Dank an meine Studenten: **Simon Kammerer, Esther Raeth, Benedikt Fella, Lukas Rinder** und **Tilman Nowak**.

Vielen Dank vor allem an **Yannick Forster** und **Tanja Fuest** mit denen ich immer gute Diskussionen führen konnte und die mir fachlich immer zur Seite standen und immer konstruktives Feedback gegeben haben. Vielen lieben Dank auch an **Melissa Kratschmayr**, die mit mir die Zähne zusammengebissen hat und eine gute Freundin und Leidensgenossin in der letzten Phase war. Danke an **Julie Wagner, Sille Thanhäuser, Sylvi Billmayer, Isabel Burow** und **Max Köhn** für die persönliche Unterstützung und euer Verständnis, während der Promotionszeit. Und zu guter Letzt, danke an meinen Freund **Konstantin Willer** und **meiner Familie**, die mich in dieser Zeit ertragen und immer unterstützt haben ☺

1 Einleitung

„Um (...) Überforderung zu vermeiden, müssen sich die Systeme stärker dem Kommunikationsverhalten des Menschen anpassen und nicht umgekehrt erhöhte Anpassungsleistungen dem Menschen abverlangt werden“

(Regel Nr. 17 (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2017, S.17))

Eine zunehmende Anzahl an Fahrzeugen ist mit Fahrerassistenzsystemen ausgestattet. Diese variieren in ihrem Automatisierungsgrad und erfahren eine sukzessive Weiterentwicklung. Der Verband für Automobilingenieure (Society of Automotive Engineers, SAE) definiert dabei sechs Stufen, vom manuellen bis zum fahrerlosen Fahren (SAE international, 2016) (Abbildung 1).

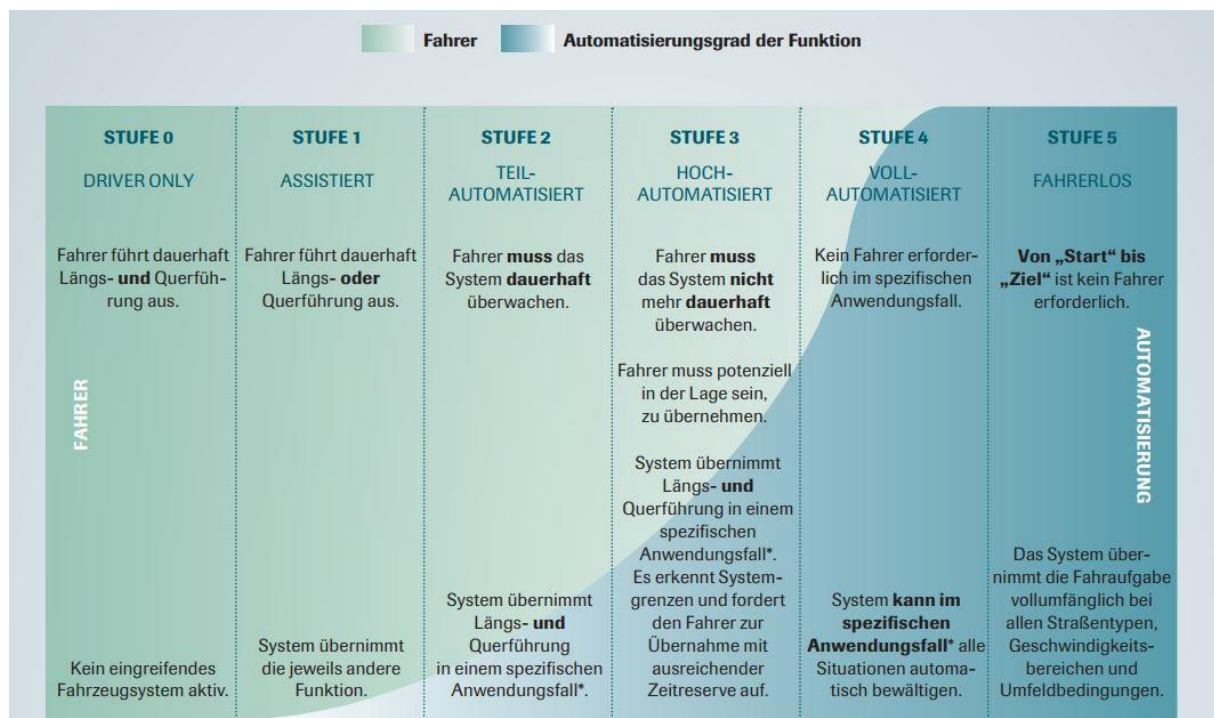


Abbildung 1. Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens (Quelle: VDA Magazin Verband der Automobilindustrie e.V., 2015).

Dies beinhaltet Systeme, die den Fahrer nur unterstützen bis hin zu Lösungen, die bereits teilautomatisiert fahren, wie beispielsweise der Autopilot von Tesla. Hinzu kommt, dass die zunehmende Automatisierung eine Verschiebung der aktiven Fahrzeugführung vom menschlichen Fahrer hin zu einem technischen Akteur bedingt (Dambock, Weissgerber, Kienle, & Bengler, 2013). Der Verband der Automobilindustrie (VDA) hat Einführungszeiträume erstellt, welche die Automatisierungsstufen abbilden und aktuelle Fahrerassistenzsysteme einordnen, wann mit vollautomatisiertem Fahren gerechnet werden kann (Verband der Automobilindustrie e.V., 2018). Laut ihrer Prognose wird es, wenn es der rechtliche Rahmen

zulässt, im Jahre 2020 hochautomatisierte und im Jahre 2030 vollautomatisierte Fahrfunktionen geben (Abbildung 2).

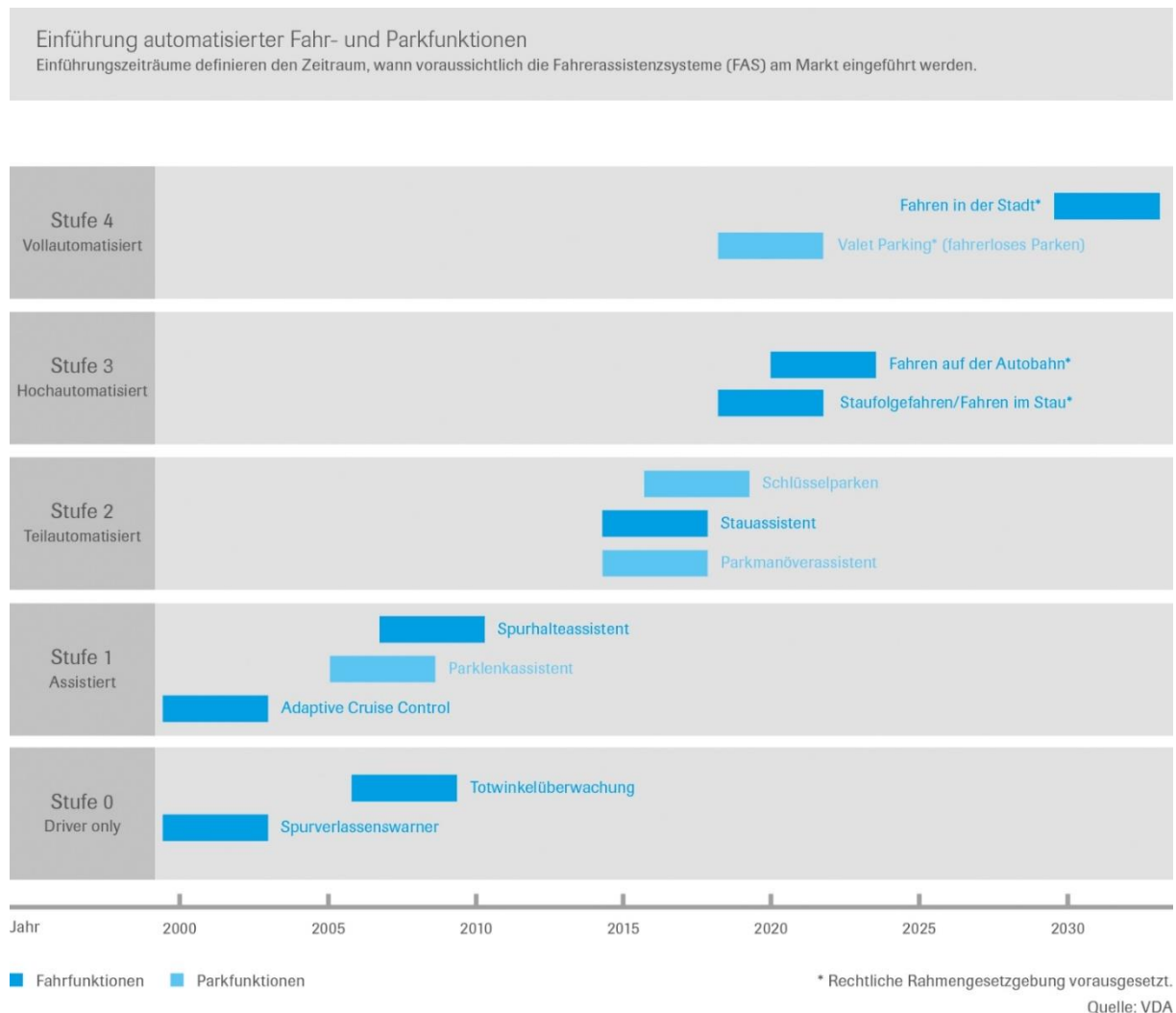


Abbildung 2. Zeitrahmen automatisierter Park- und Fahrfunktionen (Quelle: VDA, 2018).

Die Automatisierung der Fahrzeuge verspricht eine Bandbreite an Zielen, vor allem aber Reduktion der Emissionen, zunehmende Sicherheit und Steigerung des Komforts (Maurer, Gerdes, Lenz, & Winner, 2015). Beeinträchtigte Fahrer werden die Möglichkeit haben, einen höheren Grad an Mobilität zu erreichen. Um das Erreichen der Ziele gewährleisten zu können, müssen zuvor aktuelle Herausforderungen beseitigt werden.

Aktuelle Studien legen nahe, dass die Grundstimmung gegenüber automatisierten Fahrzeugen grundsätzlich positiv und die Erwartungshaltung der Bevölkerung hoch ist (Kyriakidis, Happee, & De Winter, 2015; Payre, Cestac, & Delhomme, 2014; Rödel, Stadler, Meschtscherjakov, & Tscheligi, 2014). Auf der anderen Seite stehen Sorgen und Ängste. Zu diesen zählen neben Themen wie Datensicherheit und Kontrollverlust vor allem das Thema Interaktion des automatisierten Fahrzeuges mit menschlichen Fahrern (Schoettle & Sivak, 2014).

Ein Vorfall, der die Relevanz des Themas hervorhebt, geschah erst im November 2017. Ein erster Feldversuch in Las Vegas mit einem fahrerlosen Shuttle endete nach kurzer Zeit mit einer Kollision. Der menschliche Fahrer im beteiligten Fahrzeug hatte ein anderes Fahrverhalten erwartet infolge dessen Einer der Passagiere sagte: "Der Shuttle blieb einfach stehen. Und wir dachten, er wird uns treffen, er wird uns treffen. Und dann hat er uns getroffen" (Beene & Levin, 2017).

Das Ereignis verdeutlicht die aktuelle Herausforderung im Zuge der stufenweisen Einführung automatisierter Systeme. Dies wird durch zahlreiche Autoren zum Ausdruck gebracht wird: Das Kernproblem besteht darin, dass die Kommunikation des selbstfahrenden Fahrzeuges von der des Menschen abweicht, wodurch dieses missverstanden würde (Bengler et al., 2014; Färber, 2015; Richtel & Dougherty, 2015). Dieser Thematik ist sich auch die EU Ethikkommission bewusst. In ihrem Bericht zum Thema „Automatisiertes und vernetztes Fahren“ fordert sie in Regel 17 hinsichtlich des Interaktionsverhaltens zwischen einem automatisierten Fahrzeug und einem menschlichen Fahrer eine Anpassung des automatisierten Fahrzeuges an das menschliches Fahrverhalten, um eine Überforderung des menschlicher Verkehrsteilnehmers zu vermeiden (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2017).

Eine Begegnung dieser Anforderung auf rein technischer Ebene ist unzureichend vielmehr muss eine ganzheitliche Betrachtungsweise mit der Anpassung an den menschlichen Fahrer in all seinen Facetten erfolgen (Bengler et al., 2014; Donges, 2009; König, 2015; Vollrath & Krems, 2011). Um gesellschaftliche Akzeptanz zu erlangen, ist es notwendig, dass neue Fahrerassistenzsysteme mindestens genauso gut oder besser funktionieren als der menschliche Fahrer (Banks & Stanton, 2016; Kasper, 2012). Ein wichtiger Punkt, den Lee (2018) hervorhebt ist, dass es nicht einfach so möglich ist Funktionen zu entwickeln, die das bewerkstelligen, was der Mensch zuvor ausgeführt hat. Man muss sich dessen bewusst sein, dass das automatisierte System in einer Umgebung eingebettet sein wird, in der es mit verschiedensten Akteuren (z.B. Fußgängern, menschlichen Fahrern oder Motorradfahrern) zusammenarbeiten wird. Dies mag im ersten Schritt nicht im Fokus der Entwicklung stehen, ist jedoch für eine erfolgreiche Einführung automatisierter Fahrzeuge ausschlaggebend. Dabei steht vor allem kooperatives Handeln im Vordergrund.

Aktuelle Spurwechsel- und Folgemodelle (Chen, 2010; Hansen, Schulz, Michael, & Konigorski, 2016) basieren auf Realdaten, die aus dem Verkehr gewonnen wurden. Diese decken jedoch den Aspekt der menschlichen Wahrnehmung, Attribution und impliziten Regeln der Kommunikation, derer sich ein Mensch im Straßenverkehr in der Interaktion bedient (Risser, 1987), unzureichend ab. Genau diese Mechanismen sind es, die Beachtung finden

müssen, um im Straßenverkehr akzeptiert zu werden (Banks & Stanton, 2016; Nees, 2016). Somit ist gerade in diesem Bereich ein erhöhter Forschungsbedarf, aber auch eine erhöhte Dringlichkeit geboten (Müller, Risto, & Emmenegger, 2016).

1.1 Motivation und Zielstellung

In der aktuellen Forschung wird aufgezeigt, dass autonome Fahrzeuge nicht nur auf eine kooperative Art und Weise mit den anderen Fahrern kommunizieren, sondern auch eindeutig ihre Intention kommunizieren müssen, um akzeptiert zu werden (Färber, 2015; Müller, Risto, & Emmenegger, 2016; Fuest et al., 2018). Im Zuge dessen wird bereits die Fragestellung der Außenwahrnehmung und Kommunikation eines autonomen Fahrzeuges mit menschlichen Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern und Fahrradfahrern in innerstädtischen Szenarien erforscht (Beggiato, Witzlack, & Krems, 2016; Rothenbücher, Li, Sirkin, Mok, & Ju, 2016; Witzlack, Beggiato, & Krems, 2016). Dies ist allerdings für Szenarien auf der Autobahn nicht der Fall.

Aktuell werden Fahrfunktionen entwickelt, die für bestimmte Anwendungsfälle wie beispielsweise Spurwechselszenarien die Situation erfassen. Diese prädictieren, wie die Umgebungsfahrzeuge im nächsten Schritt fahren werden (Chen, 2010). Darauf basierend werden Entscheidungen für die eigene Fahrweise getroffen. Dabei werden relevante Situationsaspekte wie z.B. Fahrdaten oder Umgebungsvariablen als Input genommen, um ein bestimmtes Fahrverhalten auszulösen.

Hierbei wird nicht beachtet, dass andere menschliche Fahrer dieses Verhalten erleben und darauf entsprechend reagieren (Fekete, Vollrath, Huemer, & Salchow, 2015). Aus technischer Sicht mag die Situation gut und sicher gelöst worden sein. Der menschliche Fahrer, der davon "betroffen" ist, erlebt dies aber möglicherweise als unsicheres oder im entgegengesetzten Fall aggressives Verhalten.

In der vorliegenden Arbeit wird daher die Außenwirkung in den Vordergrund gestellt.

Dazu wird zunächst untersucht, wie Fahrer in einer bestimmten Situation diese nicht nur lösen, sondern mit anderen Fahrern mithilfe ihres Fahrverhaltens kommunizieren.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen wird dann ein Algorithmus entwickelt, wie auch automatisierte Fahrzeuge ein entsprechendes Verhalten zeigen können. Dies wird in einem abschließenden Versuch validiert. Die Außenwahrnehmung spielt eine große Rolle, gerade wenn es darum geht, dass das Fahrverhalten, bestimmte Attributionen auslösen und ein bestimmtes Fahrverhalten triggern kann (Fekete et al., 2015).

In der vorliegenden Arbeit wird somit ein menschenzentrierter Ansatz für die Interaktion zwischen menschlichen Fahrern und automatisierten Fahrzeugen anhand eines spezifischen Anwendungsszenarios entwickelt und evaluiert.

Der Fokus liegt dabei auf einer Spurwechselsituation im Niedriggeschwindigkeitsbereich bei 30 km/h auf der Autobahn auf Manöverebene. Dies hat folgende Gründe:

Forschung, die sich auf ein Autobahnszenario fokussiert, konzentriert sich zwar auf kooperatives Interagieren im Verkehr (Albert, Lange, Schmidt, Wimmer, & Bengler, 2015; Bengler, Zimmermann, Bortot, Kienle, & Damböck, 2012; Zimmermann et al., 2018; Zimmermann, Fahrmeier, & Bengler, 2015), die impliziten Regeln der Kommunikation, die zwischen Verkehrsteilnehmern gelten, werden dennoch außer Acht gelassen (Färber, 2015).

Gerade Interaktion im Niedriggeschwindigkeitsbereich bei 30 km/h (Fuest, Sorokin, Bellem & Bengler, 2018) stellen eine besondere Herausforderung hoher Komplexität dar (Fastenmeier, 1995; Schweigert, 2003), da dort die Kommunikation bzw. Interaktion mehr im Fokus steht als bei höheren Geschwindigkeiten (Färber, 2015). Fahrstreifenwechsel gehören zu den komplexesten und riskantesten Szenarien im Straßenverkehr (Ammoun, Nashashibi, & Laurgeau, 2007) und erfordern nicht nur ein hohes Maß an kognitiver und motorischer Beanspruchung (Brackstone, McDonald, & Wu, 1998; Ehmanns, 2001), sondern auch eine aktive Abstimmung und Kooperation zwischen den Verkehrsteilnehmern (Zimmermann et al., 2018). Ca. 20 % der Straßenverkehrsunfälle in den USA lassen sich auf Fehler beim Spurwechsel zurückführen (Golob & Recker, 2004; Pande & Abdel-Aty, 2006). Der Spurwechsel zählt auf der Autobahn zu einer der häufigsten Unfallarten (Heesen, Baumann, & Kelsch, 2012). Im Rahmen dieser Arbeit werden beim Fahrstreifenwechselszenario sowohl die Einscherer- als auch die Folgefahrerperspektive betrachtet.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit untersucht wie Kooperationsbereitschaft bei einem Fahrstreifenwechsel objektiviert werden kann, um mit daraus abgeleiteten Parametern Schlüsse für die Modellierung der Kommunikation von automatisierten Fahrzeugen mit menschlichen Fahrern zu ziehen. Daher dient das **zweite Kapitel** dazu, ein Grundverständnis über den Stand der Forschung zu vermitteln. Daher wird auf Kooperation im Allgemeinen und speziell im Straßenverkehr eingegangen (**Kap. 2.1**). Die Wahrnehmung der Kooperationsabsicht hängt von dem Konstrukt der Eindeutigkeit ab, dem ein separates Kapitel gewidmet wird soll (**Kap. 2.2**). Im nächsten Schritt wird Kommunikation im Straßenverkehr beleuchtet (**Kap. 2.3**), welche als Mittel fungiert, um kooperatives Verhalten umzusetzen. Den Abschluss bildet die Beschreibung der

Fahrstreifenwechselsituation als auch der Umgebungsfaktoren (**Kap. 2.4**). Das dritte Kapitel wird mit dem Stand der Technik abgerundet. Dieses ordnet Fahrerassistenzsysteme zunächst in den Gesamtkontext ein (**Kap. 3.1**) und gibt einen Überblick über die bestehenden Fahrerassistenzsysteme (**Kap. 3.2 & 3.3**) in diesem Bereich. Zudem beleuchtet es bestehende Modelle, die den Fahrstreifenwechsel charakterisieren und sich in Fahrstreifenwechsel- und Folgemodelle (**Kap. 3.4**) untergliedern lassen. Im Anschluss sollen die Grenzen der Modelle aufgezeigt werden. Der Theorieteil schließt mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Punkte (**Kap. 4**) als auch dem Aufzeigen der sich daraus ergebenden Forschungsfragen (**Kap. 5**).

Diese werden nun im Hauptteil der Arbeit empirisch untersucht. **Kapitel 6, 7 und 8** stellt die Explorationsphase dar. Hier wird das menschliche Kooperationsverhalten aus Einscherer- als auch Folgefahrerperspektive betrachtet werden. **Kapitel 9** fasst die Ergebnisse der Studien kurz zusammen. **Kapitel 10** stellt eine Evaluationsphase dar. Basierend auf den Ergebnissen der zuvor durchgeführten Studien sollen nun zwei neue Fahrstrategien, bezogen auf eine Situation aus der Folgefahrer- als auch Einschererperspektive mit den in der Verkehrssimulation PELOPS bestehenden Modellen verglichen und auf ihre Akzeptanz bezogen auf die Interaktion zwischen menschlichen und autonomen Fahrzeugen hin getestet werden. In **Kapitel 11** wird in Form eines Exkurses aufgezeigt, wie die Daten für die Entwicklung einer Fahrstrategie mittels maschinellem Lernen genutzt werden können. **Kapitel 12 und 13** runden die Arbeit durch eine zusammenfassende Diskussion als auch einem Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf ab. Eine grafische Übersicht der einzelnen Kapitel bietet Abbildung 3.

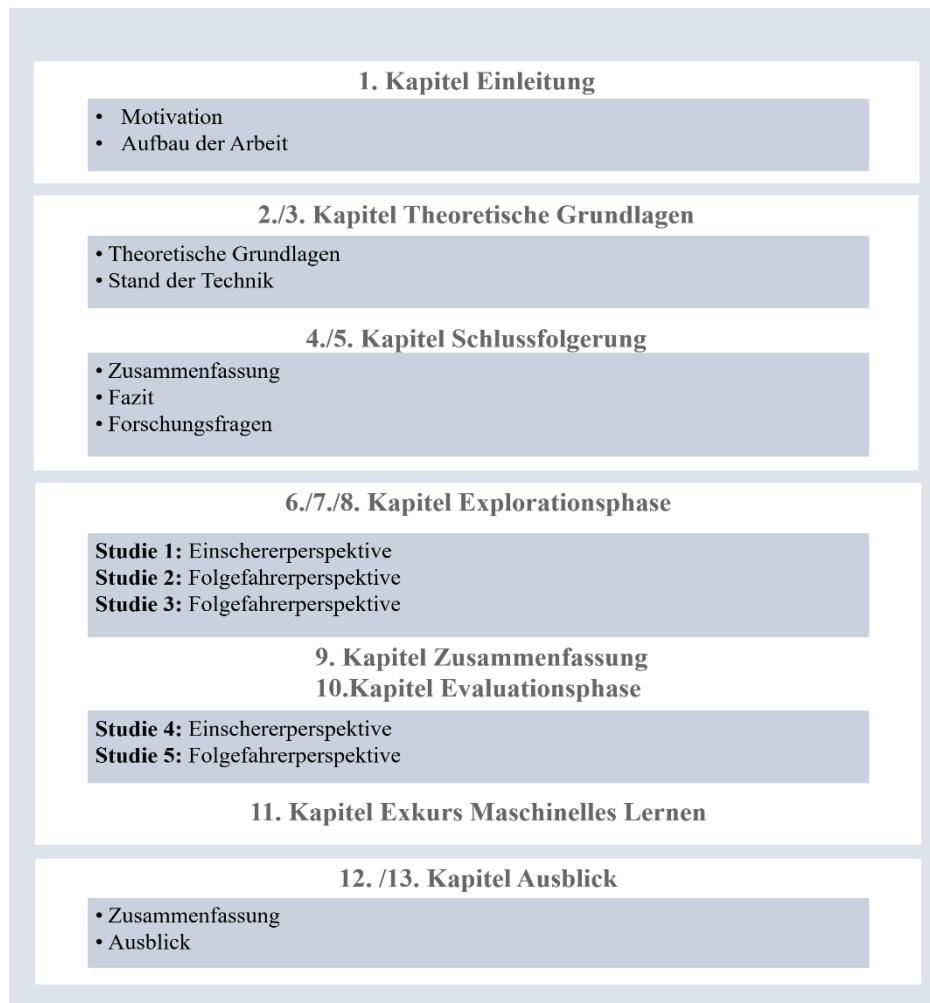


Abbildung 3. Struktur der Dissertation.

Die vorliegende Arbeit stellt eine Verknüpfung zwischen den Erkenntnissen aus der Forschung der Psychologie und dem Ingenieurwesen dar. Es wird der Versuch gemacht Grunderkenntnisse aus den Bereichen der Kommunikation und Kooperation auf den technischen Bereich der Modellierung einer Fahrfunktion zu übertragen, um somit eine verbesserte und für den Menschen verständlichere Fahrfunktion zu bieten. Die darauf basierenden Modelle sollen einen Anstoß geben, vermehrt die Erkenntnisse und das Vorgehen der Psychologie bei der Entwicklung von Fahrfunktionen zu integrieren. Im Zuge zunehmender Automatisierung kommt gerade der psychologischen Komponente, wie insbesondere Menschen miteinander interagieren und kommunizieren, als auch wie sie voneinander wahrgenommen werden, eine bedeutende Rolle zu. Die Arbeit soll dazu beitragen, die Akzeptanz und die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Zusätzlich erweitert sie den aktuellen Stand der psychologischen Forschung im Bereich Fahrer - Fahrzeug Interaktion bzw. den technischen Bereich um Modelle mit einer psychologischen Komponente.

I Theoretischer Hintergrund

2 Stand der Forschung

Der Stand der Forschung ist in vier Abschnitte unterteilt, die die Basis für die Gestaltung des Methodenteils liefern. Somit wird im ersten **Abschnitt 2.1** auf die Bedeutung von kooperativem Verhalten allgemein und im Verkehrskontext eingegangen. In **Kap. 2.2** wird die Eindeutigkeit der Kooperationsabsicht betrachtet, welche eine Vorabbedingung des kooperativen Verhaltens darstellt. Im dritten **Abschnitt 2.3** wird auf die Kommunikation eingegangen, die als Mittel für kooperatives Verhalten fungiert (Hübner, 2012). Im **Abschnitt 2.4** erfolgt die Beschreibung des Versuchsszenarios einer Fahrstreifenwechselsituation und den dahinterliegenden Parametern, die das Fahrverhalten beschreiben. **Abschnitt 2.5** nimmt durch die Methode der Objektprädiktion eine Gewichtung der Parameter je nach Situation vor. Der Stand der Forschung schließt mit dem Aufzeigen verwandter Themenfelder (**Kap. 2.6**), einer Zusammenfassung und einem Fazit (**Kap. 2.7**).

2.1 Kooperatives Verhalten

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Bedeutung und Verwendung des Begriffs Kooperation gegeben. Zunächst wird allgemein auf den Begriff inklusive Eigenschaften, die kooperatives Verhalten widerspiegeln, eingegangen. Im nächsten Schritt wird der Fokus auf kooperatives Verhalten im Straßenverkehr gelegt und die Faktoren näher beleuchtet, die kooperatives Verhalten beeinflussen. Anschließend erfolgt eine Darstellung der Auswirkungen kooperativen Verhaltens.

2.1.1 Begriffserklärung und Bedeutung.

Je nach Fachrichtung werden unterschiedliche Schwerpunkte von kooperativem Verhalten als wichtig erachtet, was sich in den Definitionen widerspiegelt.

Überblick Definitionen

Unter Kooperation (lat. cooperari = zusammenarbeiten) versteht man die „Zusammenarbeit, besonders auf politischem oder wirtschaftlichem Gebiet“ (Duden, o.D., Absatz 3). Laut dem Oxford Dictionary (2019) ist Kooperation eine Handlung oder ein Prozess, indem man auf ein gemeinsames Ziel hinarbeitet. Damit kooperatives Verhalten stattfinden kann, müssen bestimmte Vorabbedingungen gegeben sein. Deutsch (2011) sieht Kooperation in einer Konfliktsituation, die auf einen gemeinsamen Nutzen ausgerichtet ist. Mataric (1994) definiert kooperatives Verhalten als eine Form von Interaktion, die auf Kommunikation basiert. Malone und Crowston (1994) betrachten Kooperation in Zusammenhang mit Kollaboration und

Wettbewerb. Sie betonen, dass alle Begriffe eine Abhängigkeit zwischen Aktivitäten beschreiben und als unterschiedliche Ansätze für Koordination angesehen werden können. Bei Kooperation liegt der Fokus auf einem gemeinsamen Ziel.

Khamis, Kamel und Salichs (2006) identifizierten verschiedene Gründe, warum kooperatives Verhalten gezeigt wird: Dazu zählen u.a. das Erreichen eines eigenen oder gemeinsamen Zieles, die Vermeidung von Konflikten, um eine Belohnung zu erhalten oder um eine gemeinsame Entscheidung fällen zu können. Auch Nowak (2006) argumentiert vor allem aus evolutionärer Sicht, dass Kooperation ein Verhalten von egoistischen Individuen ist, bei der die direkte oder indirekte Reziprozität im Mittelpunkt steht.

Je nach Fachdisziplin bzw. Kontext als auch innerhalb der Fachdisziplinen wird Kooperation unterschiedlich definiert (Axelrod, 1984). Da der Fokus auf Kooperation bzw. kooperativem Verhalten im Verkehr gelegt ist, soll im Folgenden der Schwerpunkt auf derartige Definitionen gelegt werden. Aus verkehrspsychologischer Sicht hebt Ellinghaus (1986) als Grund für kooperatives Verhalten das Eigeninteresse hervor. Er sieht den Fokus auf dem Erreichen eines gemeinsamen Zieles, bei dem man sich gegenseitig unterstützt. Maag (2004) sieht kooperatives Verhalten als Pendant zu rücksichtslosem Verhalten, das auf Manöverebene angesiedelt ist und als Reaktion auf eine entsprechende Situation zu verstehen ist. Benmimoun, Neunzig und Maag (2004) verstehen kooperatives Verhalten als Oberbegriff für partnerschaftliches und professionelles Verhalten. Je nach Kosten – Nutzen Abwägung kommt eher das eine oder andere Verhalten zum Tragen. Im technischen Kontext nutzen Khamis et al. (2006) eine allgemeinere Definition und verstehen Kooperation

“as the practice of hardware and/or software entities working together in order to achieve a certain objective. This objective can be, but is not limited to, achieving individual or common goals, division of labor, collective autonomy, conflict avoidance, achieving maximum reward, maintaining system functionality, knowledge and information acquisition and/or sharing or achieving collective intelligent behaviors” (S.1499).

Für die Trajektorienplanung von autonomen Flugzeugen unterscheiden Schouwenaars, How und Feron (2004) zwischen nichtkooperativer und kooperativer Lösung von Konflikten, die sich darin differenzieren, dass zweiteere im Austausch von Informationen und Offenlegen der Absicht besteht. Im Bereich Vehicle to Vehicle (V2V) Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen sehen Bouroche, Hughes, & Cahill (2006) die Kooperation im Informationsaustausch und Koordination der Handlungen. Ähnlich sehen es Vacek, Nagel, Batz, Moosmann, und Dillmann (2007), die von gemeinsamer Wahrnehmung, Austausch von

Informationen und einem angemessenen Verhalten sprechen. Wang et al. (2016) verstehen in diesem Kontext Folgendes darunter

“In non-cooperative driving systems, the controlled vehicle considers the system with respect to its direct predecessor and only optimizes its own situation. [...] model cooperative driving systems using this framework where controlled vehicles use information transmitted via V2V communication to improve the situation awareness (cooperative sensing) and maneuver together with other vehicles under a common goal (cooperative control)” (S.293).

Hoc (2001) definiert zwei Bedingungen, die gegeben sein müssen, um sich kooperativ zu verhalten:

(1) Each one strives towards goals and can interfere with the other on goals, resources, procedures, etc. (2) Each one tries to manage the interference to facilitate the individual activities and/or the common task when it exists. The symmetric nature of this definition can be only partly satisfied (S.515)

Düring (2006) analysierte Definitionen von Kooperation in verschiedenen Kontexten und stellte darauf basierend einen generischen Kriterienkatalog auf, anhand dessen Kooperation je nach Kontext und Fokus eingeordnet werden kann. Dabei betrachtet er Kooperation nach den Gesichtspunkten Nutzen, Ziele, Verhalten und Szene in denen Kooperation stattfindet (Tabelle 1).

Tabelle 1. Kategorisierung kooperativen Verhaltens. Eigene Darstellung in Anlehnung an Düring (2006).

Kategorien	
Nutzen	Steigerung des Nutzens eines Einzelnen
	Steigerung des Nutzens des Schwächeren
	Steigerung des Nutzens aller
	Positiver Gesamtnutzen
Ziele	bessere Zielerreichung
	Erreichung gemeinsamer Ziele
	alle Agenten erreichen ihr Ziel
	gemeinsames Ziel
Verhalten	widerspruchsfreie Ziele
	Zusammenarbeit
	positives Verhalten
	Verzicht auf das eigene Recht
	Verhalten innerhalb eines Plans
	Abwägung zwischen gemeinschaftlichen und egozentrierten Entscheidungen
	basiert auf Reziprozität
Szene	koordiniertes Verhalten
	Kommunikation
	Kooperative Situation
	Zwei oder mehr Beteiligte

Das Ziel dieser Arbeit ist es zu ermitteln, wie eine kooperative Außenwirkung beim Fahrstreifenwechsel auf Parameterebene erzielt werden kann. Die Erkenntnisse dieser Arbeit sollen in ein entsprechendes Fahrerassistenzsystem einfließen. Deswegen wurde auf Basis von Dürings (2006) Kategorisierung (Tabelle 1) folgende Punkte für die Definition von kooperativem Verhalten gewählt:

Kooperatives Verhalten beschreibt in diesem Zusammenhang einen positiven Gesamtnutzen, da das Ziel die Gewährleistung der Sicherheit der Interaktionspartner ist. Dies soll durch ein positives, aufeinander abgestimmtes Verhalten erzielt werden. In diesem Szenario wird der Fokus auf zwei Interaktionspartner gelegt, bei denen kooperatives Handeln möglich ist, wobei diese Situation durch Kommunikation gelöst wird. Der Grund hierfür ist, dass eine Situation mit zwei Interaktionspartnern gut mithilfe von psychologischen Studien zu untersuchen ist, um Erkenntnisse zu gewinnen.

Das Anwendungsszenario in dieser Arbeit ist ein Fahrstreifenwechsel, in dem zwei Teilnehmer miteinander interagieren. Um ein besseres Verständnis zu bekommen, was Kooperation auf Verhaltensebene bedeutet, soll im Folgenden auf die Merkmale kooperativen Verhaltens beim Fahrstreifenwechselszenario eingegangen werden.

Merkmale kooperativen Verhaltens beim Fahrstreifenwechsel

In der Literatur finden sich Studien, die Eigenschaften und Merkmale kooperativen Verhaltens subjektiv als auch objektiv beschreiben.

Ellinghaus (1986) setzt kooperatives mit partnerschaftlichem Verhalten gleich. In seiner Studie zu partnerschaftlichen Verhaltensweisen im Straßenverkehr, werden u.a. folgende Verhaltensweisen genannt:

- Verzicht auf Vorfahrt
- Bedanken durch freundliche Geste
- Verlangsamen, um Einscheren zu erleichtern

Hidas (2002) hebt drei Verhaltensweisen bei einem kooperativen Spurwechsel hervor:

- Der Fahrer zeigt seine Intention an.
- Dies erkennt das Folgefahrzeug und öffnet die Lücke nach vorne.
- Wenn die Lücke groß genug für einen sicheren Spurwechsel ist, führt ihn das Fahrzeug aus.

Der Unterschied zum erzwungenen Spurwechsel liegt darin, dass bei diesem nur das einscherende Fahrzeug einen aktiven Part einnimmt und die Reihenfolge der Entscheidungen variiert. Mit erzwungenem Spurwechsel ist hierbei gemeint, dass das einscherende Fahrzeug

das Folgefahrzeug zwingt abzubremsen, um dem anderen Fahrer einen Spurwechsel zu ermöglichen.

Risser (1987) betrachtet kooperatives Verhalten beim Fahrstreifenwechsel im Sinne einer Pay - Off Matrix. Er unterscheidet dabei vier Fälle aus Einscherer - als auch aus Folgefahrerperspektive: Aus Einschererperspektive betont er die aktive Kontaktaufnahme als kooperatives Verhalten, während ein unkooperativer Fahrer zwar blinkt, aber nur an seine Interessen denkt, ohne auf den anderen Fahrer einzugehen. Dagegen ist ein Folgefahrer kooperativ, wenn er den Fahrer vor sich einscheren lässt und unkooperativ, wenn er nicht auf den anderen eingeht und stattdessen konstant weiterfährt oder beschleunigt (Risser, 1987).

Dieses Kapitel demonstriert, dass bestimmte Verhaltensweisen mit wahrgenommener Kooperationsbereitschaft assoziiert werden. Dies unterstreicht die Tatsache, dass bestimmte Parameter bzw. Parameterkombinationen in einer Fahrstreifenwechselsituation eine bestimmte Außenwirkung auf den umgebenden Verkehr erzeugen können. Die Definition eines kooperativen bzw. unkooperativen Verhaltens beim Fahrstreifenwechsel von Risser (1987) gibt Anhaltspunkte, welche Verhaltensweisen/Parameter in einem Fahrstreifenwechselszenario relevant sein könnten. Aufgrund dessen wird die Beschreibung der Kooperation bei einem Fahrstreifenwechsel übernommen. Risser (1987) definiert in dieser Situation zwei Verhaltensweisen als kooperativ: das Einscheren lassen und die „aktive“ Kontaktaufnahme.

Bevor es überhaupt zu einer kooperativen Handlung kommen kann, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein, die im nächsten Abschnitt kurz erläutert werden.

Voraussetzung für kooperatives Verhalten

Die Basis für kooperatives Verhalten sind nach Loomis (1959) und Vertrauen und Kommunikation als Mittel um Vertrauen aufzubauen. Vertrauen als wichtigsten Faktor für Kooperation fanden auch andere Forscher (Deutsch, 1958; McKnight, Cummings, & Chervany, 1998). Um Vertrauen aufzubauen, muss in der Situation ersichtlich sein, dass der Gegenpart wohlwollende Absichten hat, die auf der Verhaltensebene zum Ausdruck gebracht werden können (Holmes, 2004; Mayer, Davis, & Schoorman, 1995; Simpson, 2007). Hinzu kommt neben der Wahrnehmung der Intention des Anderen zu kooperieren noch als weiterer Faktor, dass sich die Person ihrer Rolle bewusst sein muss (Bartsch & Hübner, 2004). Paternotte (2014) betonte u.a. ebenfalls die richtige Interpretation der Situation von allen Parteien, als auch die Wahl der richtigen Handlung bzw. Reaktion. Bezogen auf kooperatives Verhalten im Straßenverkehr listen Benmimoun et al. (2004) fünf Voraussetzungen auf, die vorab erfüllt sein müssen: Der Fahrer muss die Situation wahrnehmen. Das inkludiert, dass er

- nicht mit anderen ablenkenden Tätigkeiten beschäftigt ist, die zu viele kognitive Ressourcen beanspruchen (1).
- Er muss die Intention des Anderen zu kooperieren erkennen und sich auch in der Verantwortung sehen (2 und 3).
- Dabei dürfen Rechtsvorschriften und Sicherheitsaspekte nicht außer Acht gelassen werden (4).
- Der letzte Punkt ist eine Kosten - Nutzen Abwägung, die in partnerschaftlichem oder professionellem Handeln mündet (5).

Dabei geht partnerschaftliches Verhalten damit einher, dem anderen Fahrer Vorrang zu gewähren, während das professionelle Verhalten als Ziel die Verkehrseffizienz betont. Je nach Grundmotiv kommt das ein oder andere Verhalten zum Tragen.

Zusammenfassend können folgende Erkenntnisse für die Arbeit hinsichtlich der Außenwahrnehmung von kooperativem Verhalten übernommen werden:

Kooperation entspricht in diesem Kontext einer Interaktion zwischen zwei Teilnehmern, die als oberstes Ziel die Gewährleistung der Sicherheit hat. Die Interaktion ist auf positives Verhalten, ausgelegt. Diese Interaktion betont eine sich ergänzende Zusammenarbeit. Dies bedeutet, sich anders als sonst zu verhalten, um dem Interaktionspartner zu ermöglichen seine Ziele zu erreichen oder um sich mit dem Handeln eines anderen abzustimmen.

Kooperation bedeutet in der Fahrstreifenwechselsituation nach Risser (1987) das Einscheren lassen, als auch die aktive Kontaktaufnahme. Dabei wird jedoch der Handlungsspielraum offengelassen, auf welche Parameter sich diese Definition bezieht. Um nun selbst kooperativ zu handeln, müssten zusammenfassend Folgendes nach Benmimoun, et al. (2004) gegeben sein. Das Kooperationsangebot muss nicht nur als solches wahrgenommen werden, sondern der Fahrer muss sich zusätzlich noch in der Verantwortung sehen, auf das Kooperationsangebot des anderen Fahrers einzugehen.

Daher stellt sich die Frage unter welchen Umständen kooperativ gehandelt wird.

Diese Kosten-Nutzen Abwägung ist von verschiedenen Faktoren abhängig, die im nächsten Kapitel vorgestellt werden sollen.

2.1.2 Einflussfaktoren auf kooperatives Verhalten

Nach Wilde (1976) gibt es eine Vielzahl an Faktoren, die sich auf die Bereitschaft zu kooperativem Verhalten auswirken. Eine Übersicht hierzu findet sich bei Benmimoun et al. (2004). Einflussfaktoren lassen sich nach ihnen in drei Bereiche untergliedern, die im Folgenden näher dargestellt werden (Abbildung 4):

Personale Einflussfaktoren beziehen sich auf Faktoren innerhalb des Individuums. Es kann mit einer Kosten - Nutzen Abwägung verglichen werden, wobei bestimmte Faktoren wie motivationale Zustände (z.B. Zeitdruck, Kritikalität der Situation) und Fahrerzustand (z.B. Ärger) einen moderierenden Effekt haben können (Benmimoun et al., 2004; Wilde, 1976). Des Weiteren nennt Wilde (1976) zusätzlich Faktoren wie Erwartungshaltung oder Persönlichkeit.

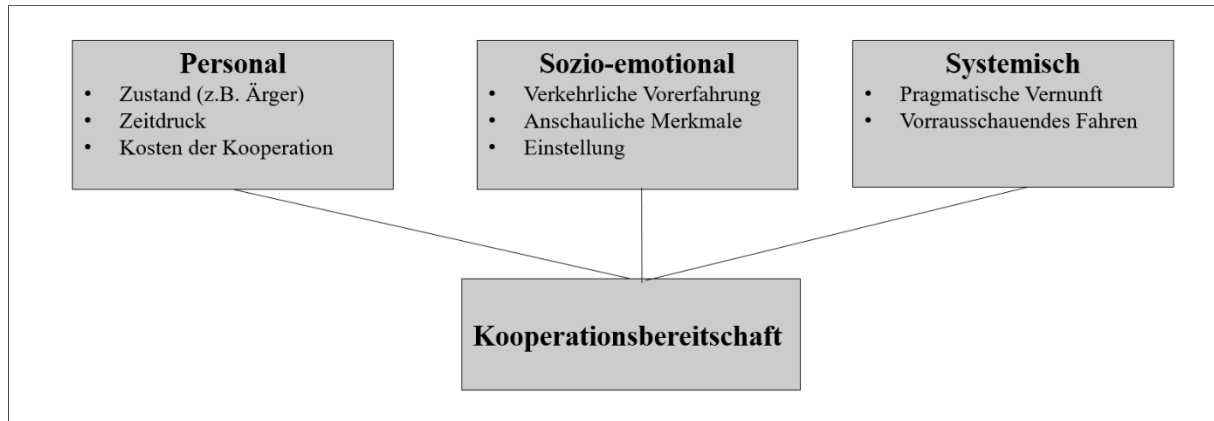


Abbildung 4. Grafische Darstellung der Einflussfaktoren auf Kooperationsverhalten (Quelle: Benmimoun et al., 2004).

Sozio - emotionale Faktoren (Dyadische Faktoren) beziehen sich vor allem auf den Fahrer, mit dem interagiert wird und die Auswirkungen auf Diesen. Beispielsweise würde eine erhöhte Verkehrsdichte bei einer Autobahneinfahrt eine höhere Hilfsbedürftigkeit nach kooperativem Handeln erfordern. Somit spielt als moderierender Faktor die Fähigkeit zur Empathie und Perspektivenübernahme aus Sicht des Kooperierenden eine große Rolle.

Systemische Faktoren beziehen sich auf die Fähigkeit, sich über die Auswirkungen bzw. den Gesamtnutzen auf den umliegenden Verkehr im Klaren zu sein. Dies bringen vor allem vorausschauende und erfahrene Fahrer mit sich.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass verschiedene interne Faktoren einen Einfluss darauf haben können, ob sich ein Fahrer kooperativ verhalten wird. Die Untersuchung innerer Zustände würde jedoch den Umfang sprengen und ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Der Fokus dieser Arbeit liegt darauf zu identifizieren, wie sich Kooperationsbereitschaft beim Fahrstreifenwechsel objektivieren lässt, um eine Handlungsempfehlung geben zu können, wie ein kooperatives, autonomes Fahrerassistenzsystem ausgelegt werden müsste. Die Bedeutsamkeit, die kooperatives Verhalten mit sich bringt, soll im nächsten Kapitel näher ausgeführt werden, in dem die Folgen von kooperativem Verhalten dargestellt werden.

2.1.3 Auswirkung kooperativen Verhaltens im Straßenverkehr

Nach Benmimoun et al. (2004) können die Folgen kooperativen Verhaltens in drei Effizienzkriterien zusammengefasst werden:

Die verkehrliche, Belastungs- und emotionale Effizienz. Während die Verkehrseffizienz auf Metaebene betrachtet wird, beziehen sich die Belastungs- und emotionale Effizienz auf die individuelle Ebene. Tabelle 2 gibt eine Übersicht mit Beispielen, die anhand von Studien bestätigt werden.

Tabelle 2. Darstellung relevanter Studien aufgeteilt nach Effizienzkriterien.

Effizienzkriterien	Beispiele
Verkehrliche Effizienz bezieht sich mehr auf den Verkehrsfluss.	<ul style="list-style-type: none">• Erhöhung der Verkehrssicherheit (Stiller & Pink, 2012)• Verbesserung des Verkehrsflusses (Zimmermann et al., 2018)
Belastungseffizienz Ist diese hoch, bedeutet dies, dass die Verkehrsteilnehmer einen geringeren Aufwand haben.	<ul style="list-style-type: none">• Frühzeitiger Fahrstreifenwechsel um schnelleren Autos Platz zu machen, frühzeitige Blinkersetzung (Ellinghaus, 1986)• „deutliches Fahren“ (Färber, 2015)
Emotionale Effizienz bedeutet positive Interaktionen und Erlebnisse zu fördern und negative, emotionale Erfahrungen zu verhindern.	<ul style="list-style-type: none">• Schaffen von Vertrauen, Zuversicht (McKnight et al., 1998)• Zufriedenheit, Entspannung (Zimmermann et al., 2015)• Überraschung, Freude und positive Stimmung (Maag, 2004)• Erhöhung der intrinsischen Motivation (Tauer & Harackiewicz, 2004)• Wahrnehmung von Fairness, was Bestrafungsreaktionen verhindert (Fekete et al., 2015)

Ein weiterer Faktor, der keine direkte Einordnung findet, ist das Prinzip der Gegenseitigkeit, die Reziprozität wie es Fehr und Gächter (2000) beschreiben. Hier unterscheiden sie zwischen positiver und negativer Reziprozität. Dies bedeutet, im weitesten Sinne, dass Positives mit Positivem und Negatives mit Negativem vergolten wird. In der Sozialpsychologie gibt es zahlreiche Studien, welche die Wirkung von positiven Effekten bei positivem Verhalten (z.B. jemandem einen Gefallen tun) stützen (Cialdini & Trost, 1998). Auf der anderen Seite fördert laut dem Frustrations-Aggressions-Modell von Shinar (1998) negatives Verhalten (z.B. dichtes Auffahren, Hupen) eine negative Reaktion.

Übertragen auf den Verkehrskontext fördert kooperatives Verhalten eine kooperative Reaktion (Maag, 2004; Zimmermann et al., 2015). Die Studien demonstrieren die positiven Auswirkungen von kooperativem Verhalten und unterstreichen die Wichtigkeit der Integration in das Fahrverhalten künftiger, autonom fahrender Autos.

Zusammenfassend wird Kooperation basierend auf Dürings (2006) Kategorisierung in diesem Kontext als positive, sich ergänzende Zusammenarbeit definiert, die sich dem Mittel der Kommunikation bedient und zwischen zwei Interaktionspartnern stattfindet. Ziel ist dabei die

Gewährleistung der Sicherheit für beide Parteien. Kooperatives Verhalten beim Spurwechsel zeichnet sich durch verschiedene Merkmale aus. Nach Risser (1987) umfasst Kooperation beim Spurwechsel die aktive Kontaktaufnahme des einscherenden Fahrzeuges bzw. das Einscheren lassen beim Folgefahrzeug. Die Voraussetzung, um mit anderen Fahrern zu kooperieren ist von verschiedenen Faktoren geprägt. Dabei spielen die Wahrnehmung und das richtige Interpretieren der Absicht des anderen Fahrers eine wesentliche Rolle. Zusätzlich müssen rechtliche und die Sicherheit betreffende Rahmenbedingungen eingehalten werden. Die Integration von kooperativem Verhalten in zukünftige Fahrerassistenzsysteme ist aus dem Grund wichtig, weil kooperatives Verhalten eine Vielzahl an Vorteilen mit sich bringt. Diese Arbeit konzentriert sich ausschließlich auf das Erkennen und Interpretieren von kooperativem Handeln. Die Darstellung einer Umsetzung in Form eines Algorithmus für ein Fahrerassistenzsystem würde hier den Rahmen sprengen und wird nur in einem Exkurs (Kap. 11) exemplarisch kurz beleuchtet. Neben der grundsätzlichen Bereitschaft, zu kooperieren oder nicht, ist es wesentlich, überhaupt zu erkennen, dass ein anderer Fahrer etwas tun möchte, was eine Kooperation erfordert. Dies wird im folgenden Kapitel untersucht.

2.2 Eindeutiges Fahrverhalten

Nachdem in **Abschnitt 2.1** darauf eingegangen wurde wie Menschen im Straßenverkehr kooperieren, soll in diesem Abschnitt auf eine Vorabbedingung für kooperatives Verhalten eingegangen werden, welche die Wahrnehmung der Intention beinhaltet. Viele Autoren heben die Bedeutung der eindeutigen Kommunikation hervor, wenn es um die Kooperation zwischen menschlichen Fahrern und automatisierten Fahrzeugen geht (vgl. Färber, 2015; Hidas, 2002; Müller et al., 2016; Werneke & Vollrath, 2012). Die Handlung eines automatisierten Fahrzeuges muss eindeutig interpretierbar sein und darf keinen Interpretationsspielraum lassen, da es sonst zu Verkehrskonflikten durch mehrdeutiges Verhalten kommen könnte. In einer Naturalistic Driving Study (NDS) untersuchten Simon und Bullinger (2017) emotionsauslösende Faktoren beim Fahren. Dabei sollten Probanden über eine Smartphone Applikation Ereignisse festhalten, die emotionsauslösend sind. Zu den am häufigsten genannten manöverbasierten Verhalten zählte unklares Verhalten. Dies würde vor allem Beunruhigung auslösen. Andere genannte Reaktionen waren Stress, Frustration und eine erhöhte kognitive Beanspruchung.

Diese Studie unterstreicht die Wichtigkeit eindeutiger Manöver.

Eindeutiges Fahrverhalten wird in dieser Arbeit mit der Wahrnehmbarkeit eines Reizes gleichgesetzt. Ob ein Reiz wahrgenommen wird, hängt von seiner Reizstärke ab, d.h. ob dieser

ausreichend salient bzw. auffällig ist, dass er entdeckt wird. In diesem Zusammenhang wird die Wahrnehmung eines eindeutigen Verhaltens mit einem salienten Reiz verglichen. Je stärker ein Reiz wahrgenommen wird, als desto eindeutiger wird er vom Fahrer klassifiziert (z.B. Blinkersetzung in unmittelbarer Nähe gegenüber einer Blinkersetzung in einer größeren Entfernung).

An dieser Stelle kommt das SEEV-Modell von Wickens, Goh, Helleberg, Horrey, und Talleur (2003) zum Tragen. Das Modell findet u.a. im Verkehrskontext seine Anwendung (Horrey, Wickens, & Consalus, 2006). Es besagt, dass wir uns auf die Objekte fokussieren, die die meiste Aufmerksamkeit auf sich ziehen, während wir andere Quellen ignorieren. Die Aufmerksamkeitslenkung wiederum ist von vier Faktoren abhängig: Jeweils zwei Top - Down, d.h. wissensgesteuerten, Prozessen (der Erwartung und dem Wert) und zwei Bottom - Up, d.h. reizgesteuerten Prozessen (dem Aufwand und der Salienz), die von der Umwelt gesteuert werden (siehe Abbildung 5).

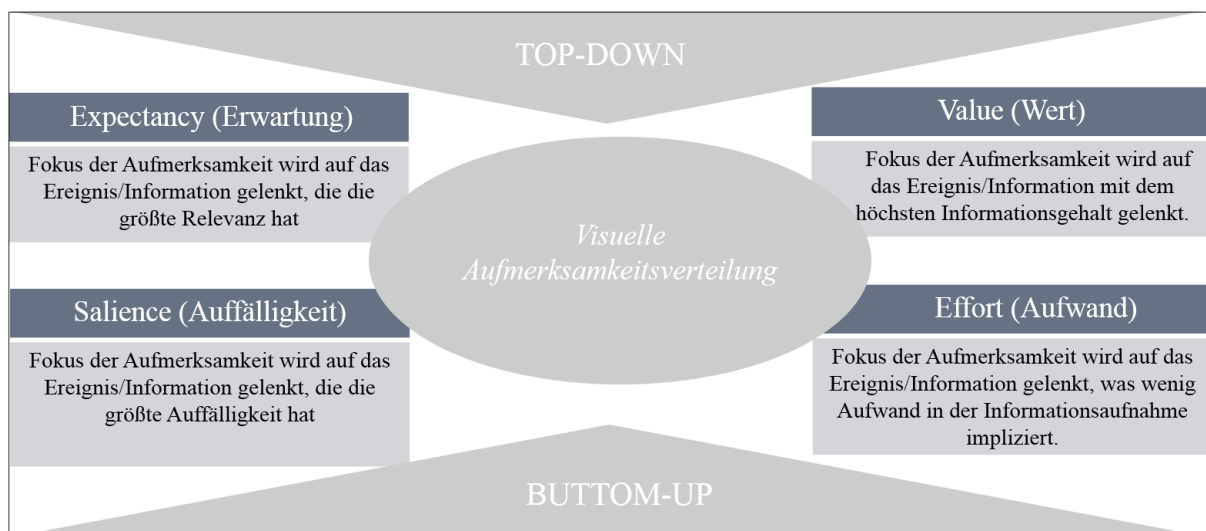


Abbildung 5. SEEV Modell nach Wickens et al. (2003).

Übertragen auf eine Einschersituation bietet der Folgefaher am meisten Informationen. Die Erwartung ist hoch, dass er auf das Blinken des einscherenden Fahrers durch Verzögern, Beschleunigen oder Geschwindigkeit konstant halten reagieren wird. Auch der Wert ist hoch, da der Wert für die Entscheidung, die Spur zu wechseln, hoch ist. Der Aufwand ist gering, da sich das Fahrzeug in dem peripheren Sichtfeld befindet und die Salienz ist je nach Reizintensität niedrig bis hoch.

Die Grundlage für die Erkennung und Wahrnehmung von Signalen in Verkehrsszenarien lässt sich durch die Signalentdeckungstheorie erklären (Green & Swets, 1966). Diese basiert auf der Annahme, dass ein Signal vor einem konstanten Hintergrundrauschen detektiert werden muss und dass es keinen absoluten Schwellenwert gibt, um ein Signal von Rauschen zu

unterscheiden. Je nach Reizintensität (Arbuthnott, 1980) wird dieser leichter wahrgenommen und kann somit eindeutiger beurteilt werden.

Die Wahrnehmung des Signals wird noch von anderen Faktoren beeinflusst. Green (2000) fand heraus, dass das Erfassen von Bewegungen vor dem Fahrzeug einfacher ist als im umgebenden Verkehr. Ein weiterer Faktor ist die Erwartung eines Signalauftretens (Green, 2000), sowie die Bedeutung für die wahrgenommene aktuelle Situation und personenbezogene Faktoren wie Alter oder Arbeitsbelastung (Alm & Nilsson, 1995).

Psychologische Studien bzgl. der Intention zwischen Autofahrern im Verkehrskontext, welche explizit die Parameterebene betrachten, gibt es wenig (Henning, 2010). Stattdessen befasst sich die Intentionserkennung, z.B. in einer Fahrstreifenwechselsituation, eher mit der Modellierung von Prädiktionen mit verschiedenen Ansätzen wie maschinellem Lernen {Formatting Citation}. Darauf soll noch differenzierter in Kap. 2.5 eingegangen werden.

Allerdings gibt es bereits Forschung im Bereich der Intentionserkennung zwischen Fußgängern und Autofahrern. So untersuchten Schmidt und Färber (2009) aus der Perspektive des Fußgängers, anhand welcher Parameter eine Intention des Anderen eindeutig vorhergesagt werden kann. In der Studie mussten sich Fußgänger in verschiedenen Situationen für oder gegen einen Wechsel der Straßenseite entscheiden, während sich ein Fahrzeug mit unterschiedlichen Fahrparametern nähert. Dabei wurden die Geschwindigkeit und die Distanz des Fahrzeuges variiert. Es zeigte sich u.a. in dieser Studie, dass die Probanden, unabhängig von der Geschwindigkeit, bei einer $TTC < 3$ s (Time to Collision, siehe Kap. 2.4.5) die Straße nicht überquerten bzw. ab einer TTC von 7 s die Straße überquerten.

Die Arbeit übernimmt das SEEV Modell (Wickens et al., 2003) als auch die Signalentdeckungstheorie (Green & Swets, 1966) als theoretische Basis, um Verständnis bezüglich Eindeutigkeit von bestimmtem Verhaltens im Verkehrskontext zu generieren. Die Theorien gehen davon aus, dass sich Menschen bei Entscheidungen für bestimmte Manöver, wie einem Fahrstreifenwechsel, auf bestimmte saliente Merkmale konzentrieren (SEEV Modell von Wickens et al., 2003). In Abhängigkeit der Stärke dieses Reizes (Signalentdeckungstheorie von Green & Swets, 1966), können Ableitungen gemacht werden, wie eindeutig das Merkmal wahrgenommen wurde. Das Merkmal kann dann entsprechend interpretiert werden, um sich letztendlich für oder gegen eine Handlung zu entscheiden. Ein Mittel um kooperatives Verhalten zu zeigen ist die Kommunikation, die im folgenden Kapitel beleuchtet wird.

2.3 Kommunikation

Nachdem auf kooperatives Verhalten eingegangen und die Grundbedingung für Kooperation dargestellt wurden, wird in diesem Abschnitt Kommunikation, als ein Mittel um kooperatives Verhalten zu zeigen (Hübner, 2012), betrachtet. Ziel dieses Kapitels ist es, zu verstehen, was Kommunikation bedeutet, wie Kommunikation im Straßenverkehr funktioniert, welche Formen der Kommunikation Fahrer im Straßenverkehr nutzen, um sich zu verständigen und welchen Fehlern Menschen bei der Wahrnehmung und Attribution unterliegen.

2.3.1 Kommunikation: Bedeutung und Modelle

Unter Kommunikation (lat. communicatio = Mitteilung, Unterredung) versteht man im wörtlichen Sinne die „Verständigung untereinander; zwischenmenschlicher Verkehr insbesondere mithilfe von Sprache, Zeichen“ (Duden, o.D., Absatz 3). Laut Merten (1977) zielt „Kommunikation (...) darauf ab, ein Mindestmaß an Verständigung zu erreichen und wird als zielgerichteter linearer Prozess verstanden, dessen Endprodukt dann die gewünschte Wirkung darstellt“ (S.16). Kommunikation kann mit sozialem Verhalten (Hölzl, 2008) bzw. Interaktion gleichgesetzt werden (Merten, 1977; Risser, 1987). Diese Interaktion definiert sich als Aktionen zwischen zwei oder mehr Akteuren, die durch Reziprozität gekennzeichnet sind (Bengler et al., 2012). Kommunikation kann als Mittel verstanden werden, um seine Intention auszudrücken und kooperatives Verhalten zu initialisieren (Fuest et al., 2018).

Es lassen sich verschiedene psychologische Modelle der Kommunikation unterscheiden. Die wichtigsten sind in **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** überblicksartig dargestellt (Röhner & Schütz, 2012).

Tabelle 3. Übersicht der Kommunikationsmodelle

Kommunikationsmodelle	Themen	Autoren
Enkodier- und Dekodiermodelle	<ul style="list-style-type: none">• Verschlüsselung der Nachricht• Optimale Übertragung	<ul style="list-style-type: none">• Schulz von Thun (1981)• Shannon (1948)
Intentionale Modelle	<ul style="list-style-type: none">• Übermittlung der Botschaft an den Empfänger• Merkmale einer gelungenen Kommunikation	<ul style="list-style-type: none">• Grice (1975)
Perspektivübernahmemodelle	<ul style="list-style-type: none">• Verständnis für die Sichtweise des anderen	<ul style="list-style-type: none">• Roger (2002)
Dialog-Modelle	<ul style="list-style-type: none">• Schaffen einer subjektiven Wirklichkeit	<ul style="list-style-type: none">• Watzlawick, Bavelas, & Jackson (1990)

Allen Modellen gemeinsam sind folgende Merkmale: Kommunikation bezieht sich mindestens auf zwei Teilnehmer. Es wird in diesem Zusammenhang vom Sender und Empfänger

gesprochen, bei der eine Botschaft ausgetauscht wird. Diese stehen in einer sich gegenseitig beeinflussenden interaktiven Beziehung. Sowohl auf Sender- als auch Empfängerebene werden bestimmte Mittel bzw. Modalitäten vorausgesetzt, wie beispielsweise durch Mimik oder Sprache. Kommunikation ist immer in einen bestimmten Kontext eingebettet. Sie muss nicht zwangsläufig bewusst geschehen (Frindte, 2008).

Im Verkehrskontext sind die intentionsorientierten Modelle von Bedeutung, da es darum geht, wie man Absichten erfolgreich übermitteln kann. Somit soll der Fokus auf intentionale Modelle gelegt werden.

Grice (1975) setzt Kommunikation mit Kooperation gleich. Er betrachtet die Faktoren, die für eine erfolgreiche Übertragung der Botschaft zwischen Sender und Empfänger notwendig sind. Wichtig ist hierbei, dass die Botschaft vom Rezipienten verstanden wird und nachvollziehbar ist. Voraussetzung hierfür ist, dass die Beteiligten ein gemeinsames Ziel verfolgen. Bezogen auf den Straßenverkehr könnte ein gemeinsames Ziel die Erhaltung der Verkehrseffizienz sein. Somit gilt nach ihm ein allgemeines Kooperationsprinzip. Darauf basierend leitete Grice (1975) vier Maximen einer erfolgreichen Kommunikation ab, die als Vorschläge für eine gelingende Kommunikation betrachtet werden können (siehe Tabelle 4). Nichteinhaltung dieser Prinzipien könnte zu Missverständnissen und Effizienzminderung z.B. in Form von Zeitverlusten führen.

Tabelle 4. Maxime der Kommunikation (Quelle: Grice, 1975).

I. Maxime der Quantität	II. Maxime der Qualität
Darunter versteht man die Menge an Information, die zur Verfügung gestellt wird.	Der Konversationsbeitrag soll die Wahrheit beinhalten.
<ol style="list-style-type: none"> 1. Sei so informativ, wie es die Situation erfordert. 2. Gestalte deinen Beitrag so, dass er nicht mehr Informationen enthält, als für die Situation angemessen. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sag nichts, von dem du denkst, dass es falsch ist. 2. Sag nichts, wofür die Beweise fehlen.
Folgen der Verletzung dieser Maxime→	Folgen der Verletzung dieser Maxime→
Zuviel oder zu wenig Informationen zu vermitteln.	Falsche Behauptungen.
III. Maxime der Relevanz	IV. Maxime der Klarheit
In dieser Kategorie wird die Relevanz der Information betont	Diese Kategorie bezieht sich darauf, wie etwas gesagt wird. Dabei wird die Eindeutigkeit hervorgehoben.
<ol style="list-style-type: none"> 1. Sag nur für die Situation Relevantes, was zum Thema gehört. 	<ol style="list-style-type: none"> 2. Vermeide die Uneindeutigkeit der Aussage. 3. Vermeide Doppeldeutigkeit. 4. Fasse dich kurz. 5. Halte dich an logische Reihenfolgen.
Folgen der Verletzung dieser Maxime→	Folgen der Verletzung dieser Maxime→
Irrelevante Informationen vermitteln.	Unklare Botschaften vermitteln.

Als Fazit hinsichtlich der Anwendbarkeit von Grices (1975) Modell auf den Straßenverkehr kann resümiert werden, dass die Maximen weitestgehend als Richtlinie genutzt werden können, um eine erfolgreiche Kommunikation zwischen Fahrern zu gewährleisten.

Dies bedeutet für diese Arbeit, die Intention durch eine Botschaft zu vermitteln, die von dem Interaktionspartner eindeutig verstanden wird. Eindeutigkeit kann sich sowohl auf einen relevanten Parameter beziehen, wie die Blinkersetzung bei einem Fahrstreifenwechsel, aber auch auf die Intensität des Parameters. So wird ein wiederholtes Blinken als eindeutiger betrachtet als ein kurzes aufblinken. Was die Eindeutigkeit im Kontext des Fahrstreifenwechsels bedeutet, soll in dieser Arbeit untersucht werden.

In diesem Kapitel wurde ein allgemeines Verständnis von Kommunikation vermittelt. Was dies nun auf den Straßenverkehr bezogen heißt, wird im nächsten Kapitel detailliert betrachtet.

2.3.2 Kommunikation im Straßenverkehr

Hoc (2001) sieht die Kommunikation als Werkzeug, um im Straßenverkehr zu kooperieren (Hoc, 2001). Im Straßenverkehr wird die Kommunikation formell über die StVO geregelt. Man spricht bei formeller Kommunikation nach Beggiato et al. (2016) auch von expliziter Kommunikation. Die StVO (Straßenverkehrsordnung) liefert Regeln und Gebote, deren Nicht-Befolgung sanktioniert werden. § 1 der StVO besagt: „Die Teilnahme am Straßenverkehr erfordert ständige Vorsicht und gegenseitige Rücksicht“ und „Wer am Verkehr teilnimmt, hat sich so zu verhalten, dass kein anderer geschädigt, gefährdet oder mehr, als nach den Umständen unvermeidbar, behindert oder belästigt wird.“ Diese Grundregel impliziert, dass Verkehrsteilnehmer zu deren Einhaltung sowohl vorausschauend fahren müssen, als auch miteinander kommunizieren bzw. kooperieren müssen. Neben der StVO zählen auch formelle Zeichen dazu.

Nach Merten (1977) dienen die gesetzlichen Regelungen als grober Rahmen, während die individuelle Situation von dem Verkehrsteilnehmer eigenverantwortlich, durch ständiges Beobachten des Verkehrsgeschehens und Anpassung des eigenen Verhaltens an das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer, reguliert werden muss.

Diese sind kulturspezifisch und werden von allen Verkehrsteilnehmern einheitlich genutzt und verstanden. In diesem Zusammenhang wird auch von informeller bzw. impliziter Kommunikation gesprochen (Wilde, 1976). Eine Übersicht über Interaktionen im Straßenverkehr liefert Abbildung 6. Interaktionen lassen sich zum einen in alternative Problemlösestrategien (Merten, 1977), um sich im Verkehr zurecht zu finden als auch den umgebenden Verkehrsteilnehmern bestimmte Botschaften über das Fahrverhalten zu

übermitteln, unterteilen. Zum anderen nutzt der Fahrer die Kommunikation, die sich sowohl implizit als auch explizit äußert, um sich zu verständigen.

Auf Abbildung 6 wird in den folgenden Unterkapiteln näher eingegangen.

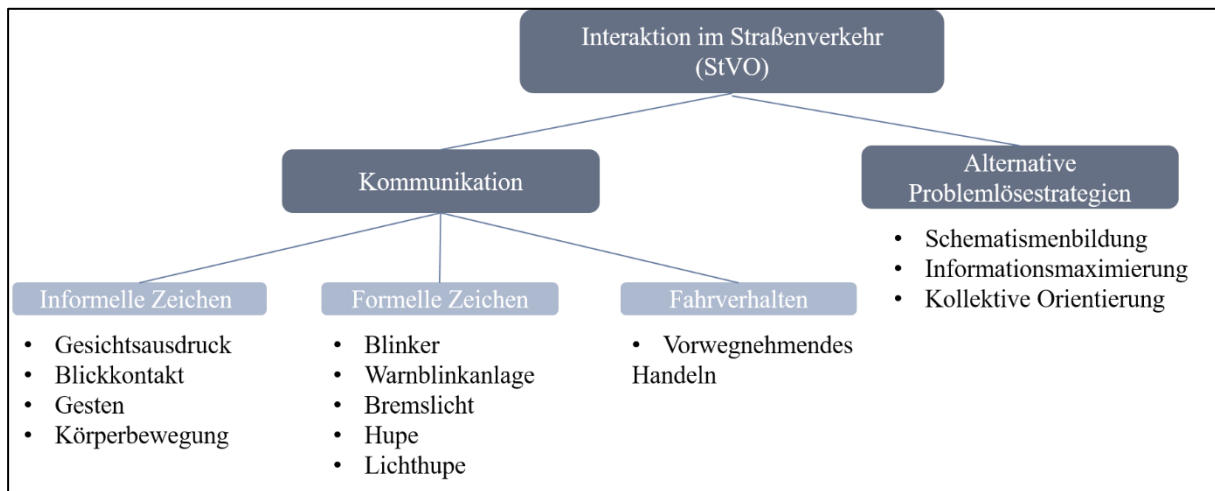


Abbildung 6. Übersicht Interaktion im Straßenverkehr (Quelle: Eigene Darstellung).

Informelle und formelle Zeichen

Risser (1987) machte im Rahmen von Fokusgruppen eine Auflistung von Zeichen, die im Straßenverkehr Anwendung finden. Nach Argyle (1972) bestehen dabei die Hauptfunktionen der nonverbalen Kommunikation darin, die gegenwärtige Situation zu regeln, die verbale Kommunikation zu unterstützen oder zu ersetzen. Eine Übersicht findet sich in Tabelle 5 und Abbildung 7.

Tabelle 5. Beispiele formeller und informeller Kommunikation mit Bedeutung. Eigene Darstellung nach Risser (1987).

Art des Zeichens	Ausdruck	Bedeutung
Formelle Zeichen	Blinken	Intention des Fahrtreifenwechsels
	Hupen	Begrüßung oder Warnung
	Warnblinkanlage	Warnung vor Verkehrsbehinderung z.B. Stau, negative Rückmeldung, Aufforderung
	Pannendreieck	Warnung vor Verkehrsbehinderung z.B. Unfall
Informelle Zeichen	Zu einem wischende Handbewegung	Vorrang gewähren
	Hand hochheben	Bedanken
	Nicken	Zustimmung
	Vogelzeichen	Drohgebärde
	Kopf schütteln, Hände zur Seite heben	Verständnislosigkeit



Abbildung 7. Beispiele informeller Zeichen: a. Bedanken, b. Vogelzeichen, c. Verständnislosigkeit.

Fahrverhalten

Unter Fahrverhalten versteht man „die Fahrzeugreaktion auf Fahrerhandlungen und auf das Fahrzeug einwirkende Störungen während der Fahrbewegung, beschrieben durch die Bewegungsgrößen“ (Heißing, Ersoy, & Gies, 2013, S.122). Eine Form, seine Intention über das Fahrverhalten zu beschreiben, ist das *vorwegnehmende Handeln* (Merten, 1977; Risser, 1987). Dies bedeutet, dass der Verkehrsteilnehmer durch kleine Handlungsschritte seine Intention aufzeigt, ohne diese komplett auszuführen. Dadurch ist für den anderen Verkehrsteilnehmer, die Absicht frühzeitig erkennbar. Beispielsweise wird ein Fahrer, der ohne zu Blinken einen leichten Querversatz macht, mit großer Wahrscheinlichkeit den Fahrstreifen wechseln wollen. Diese Art der Kommunikation kann mehr oder weniger eindeutig erfolgen und wird je nach Ausprägung unterschiedlich auf einem Kontinuum von rücksichtslos bis kooperativ wahrgenommen und interpretiert (Maag, 2004).

Andere Problemlösestrategien

Zusätzlich unterscheidet Merten (1977) andere Strategien, wie mit speziellen Situationen umgegangen werden kann, die keine direkte Kommunikation beinhalten. Diese werden in die folgenden Bereiche eingeteilt:

a. Schematismenbildung

Dies bedeutet, dass aufgrund von bestimmten Merkmalen eines Verkehrsteilnehmers auf dessen Verhalten geschlossen wird. So wird einem BMW Fahrer eher unterstellt, dass er aggressiver, rücksichtsloser und schneller fährt als ein VW Polo Fahrer (Davies, 2009). Diese Attribution von bestimmten Eigenschaften kann je nachdem bestimmte Emotionen hervorrufen, worauf im nächsten Kapitel genauer eingegangen wird.

b. Kollektive Orientierung

Dies bedeutet, dass der Verkehrsteilnehmer sein Verhalten dem Verhalten anderer anpasst. Dies kann zum Beispiel bei einer Baustelle auf der Autobahn durch das Reißverschlussverfahren gesehen werden. Faw (2013) untersuchte die Häufigkeit des

Blinkersetzens. Er fand heraus, dass Menschen im Folgeverkehr öfter den Blinker nutzten, wenn der Vordermann diesen benutzte.

c. Informationsmaximierung

Diese Strategie trifft vor allem auf unsichere Fahrer zu, die das Maximum an Informationen sammeln, bevor sie Handlungen initiieren. Dies wären beispielsweise Fahrer die auf einer Autobahn die Spur wechseln möchten und so lange warten, bis kein Auto sich in unmittelbarer Nähe auf der Zielspur befindet, um einzuscheren.

Soziale und kognitive Verzerrungen

Neben den Kommunikationsstrategien im Straßenverkehr spielt auch die soziale Wahrnehmung und Attribution des wahrgenommenen Verhaltens eine große Rolle. Dabei kommen vor allem folgende Phänomene zum Tragen:

Der *fundamentale Attributionsfehler* (Gilbert & Malone, 1995) besagt, dass Menschen das Verhalten anderer auf dispositionale Faktoren beziehen und situative Faktoren in diesem Kontext unterschätzen. In diesem Zusammenhang ist auch der *Akteur - Beobachter Effekt* (Jones & Nisbett, 1972) zu nennen, der neben der Attribution auf die Disposition Anderer die Attribution bei sich auf situative Faktoren zurückführt. Im Verkehrskontext bedeutet dies, dass Autofahrer das Verhalten anderer, die mit ihnen in Interaktion stehen, auf sich beziehen, was zu positiven oder negativen Emotionen bzw. kooperativem oder rücksichtslosem Verhalten führen kann. Nach Bliersbach (1978) schieben Verkehrsteilnehmer anderen Autofahrern die erlebte Wut und Frustration zu, wenn sie nicht vorankommen, was häufig in aggressives Verhalten umschlagen kann (Maag, 2004). Ein anderer Bias, der auch im Verkehrskontext auftritt, ist der *false - consensus effect* (Ross, Greene, & House, 1977). Dieser besagt, dass Menschen ihr Verhalten bzw. ihre Einstellung als verbreiteter ansehen als sie eigentlich ist. Dies impliziert nach Maag (2004), dass Fahrer ihr Fehlverhalten akzeptieren, während das der anderen nicht mehr toleriert wird. Ein weiteres Phänomen stellt die *Reaktanz* (Brehm, 1966) dar. Diese geht von dem Grundsatz aus, dass der Mensch ein Freiheitsbedürfnis hat. Wird er in diesem Bedürfnis eingeschränkt, führt dies zu einem inneren Widerwillen, der Reaktanz und dem Bedürfnis, die Freiheit wiederherzustellen. Dies kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Im Straßenverkehr äußert sich Reaktanz in Form einer emotionalen Reaktion wie Aggression als ein Ausdruck der Freiheitseinschränkung oder einer aggressiven Fahrweise (Ewert, 1994), was zusätzlich durch die *Frustrations-Aggressions-Hypothese* (Dollard, Doob, Miller, Mowrer, & Sears, 1939) unterstrichen werden kann, die in seiner modifizierten Version besagt, dass Frustrationen aggressives Verhalten auf emotionaler oder Verhaltensebene

auslösen können. Dies wurde durch zahlreiche Studien aus der Emotionsforschung im Verkehr bestätigt (Mesken, 2006; O'Brien, Shaw, Watson, & Lennon, 2012).

Reaktanz kann sich auch in Form einer schnelleren Aktion äußern. Adebisi und Sama (1989) zeigten, dass bei längerer Wartezeit an Kreuzungen signifikant kleinere Lücken beim Einscheren akzeptiert werden.

Das Kapitel unterstreicht die Wichtigkeit als auch die Vielfalt der Art und Weise, wie im Straßenverkehr kommuniziert wird. Zudem wird hervorgehoben, welche Auswirkungen eine „falsche“ Kommunikation auf die Wahrnehmung des Interaktionspartners haben kann.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Kooperationsbereitschaft beim Fahrstreifenwechsel zu objektivieren, um Handlungsempfehlungen für die Modellierung einer kooperativen Strategie im Fahrstreifenwechselszenario zu geben. Dies soll als Basis für die Modellierung von entsprechenden Fahrerassistenzsysteme dienen. Somit liegt der Fokus auf der Kommunikation durch das Fahrverhalten in einem Fahrstreifenwechselszenario als auch auf der expliziten Kommunikation im Rahmen der Straßenverkehrsordnung.

Das Spurwechselszenario wird im nächsten Kapitel differenzierter erläutert.

2.4 Fahrstreifenwechselsituation

Im Folgenden soll ein grundlegendes Verständnis zur Fahrstreifenwechselsituation vermittelt werden. Dieses beginnt mit einer Definition des Fahrstreifenwechsels und der aktuellen Rechtslage sowie der Motivation, einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Es folgen Fahrstreifenwechselmodelle, welche die verschiedenen Phasen des Fahrstreifenwechsels umfassen. Zum Ende werden, für den Fahrstreifenwechsel relevante Parameter, aufgelistet.

2.4.1 Definition Fahrstreifenwechsel

Während einer Fahrt stehen dem Fahrer verschiedene Fahrmanöver zur Verfügung. Ein Fahrmanöver definiert sich als eine „Aktion bzw. Aktionsfolge [Aneinanderreihung mehrerer Aktionen] eines Verkehrsteilnehmers, welche die aktuelle Fahrsituation in eine neue Fahrsituation überführt“ (Schneider, 2009, S.19). Ein Fahrmanöver, dass sich durch eine besonders hohe Komplexität auszeichnet, in Bezug auf kognitive Belastung, stellt der Fahrstreifenwechsel dar (Ehmanns, 2001; Schießl, 2008).

Unter Fahrstreifenwechsel wird im weitesten Sinne eine bewusste und wesentliche Verschiebung der lateralen Position auf angrenzende Fahrstreifen verstanden (Chovan, Tijerina, Alexander, & Hendricks, 1994; Fastenmeier, Hinderer, Lehnig, & Gstalter, 2001; Fitch et al., 2009). Der Fahrstreifenwechsel beginnt mit der lateralen Bewegung und endet, wenn sich der Schwerpunkt des Fahrzeuges zentral auf dem anderen Fahrstreifen befindet (Lee,

Olsen, & Wierwille, 2004) bzw. bis sich alle vier Räder in der neuen Spur befinden (Fastenmeier et al., 2001; Worrall & Bullen, 1970). Andere Autoren definieren den Anfang des Fahrstreifenwechsels zu einem späteren Zeitpunkt, wenn der Vorderreifen, die Fahrbahnmarkierung berührt (Fastenmeier et al., 2001; Hanowski, 2000). Der Fahrstreifen wird dabei durch zwei Fahrstreifenmarkierungen begrenzt (Maurer, Gerdes, Lenz, & Winner, 2015). Die Wahl der Definition richtet sich nach der Verfügbarkeit und Qualität der Daten aus den durchgeführten Studien.

2.4.2 Rechtliche Grundlagen

Die StVO hat neben den Grundregeln in § 1, in § 7 Benutzung von Fahrstreifen durch Kraftfahrzeuge, Regeln für den Fahrstreifenwechsel definiert (StVO, 2018). Im Folgenden soll aus diesen Paragraphen, die für diese Arbeit relevantesten Richtlinien genannt werden:

§ 1 Grundregeln

- (1) Die Teilnahme am Straßenverkehr erfordert ständige Vorsicht und gegenseitige Rücksicht.
- (2) Wer am Verkehr teilnimmt, hat sich so zu verhalten, dass kein anderer geschädigt, gefährdet oder mehr als nach den Umständen unvermeidbar, behindert oder belästigt wird.

§ 7 Benutzung von Fahrstreifen durch Kraftfahrzeuge (5)

- (1) In allen Fällen darf ein Fahrstreifen nur gewechselt werden, wenn eine Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer ausgeschlossen ist.
- (2) Jeder Fahrstreifenwechsel ist rechtzeitig und deutlich anzukündigen; dabei sind die Fahrtrichtungsanzeiger zu benutzen.

Die Rechtslage lässt, was die Umsetzung der Richtlinien angeht, einen großen Interpretationsspielraum zu. Die Konstrukte der Kooperation als auch Eindeutigkeit im Fahrverhalten finden sich in diesen wieder.

2.4.3 Gründe für Fahrstreifenwechsel

Es gibt viele Gründe einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen (Bascunana, 1995; Dagli & Reichardt, 2002, Fastenmeier et al., 2001; Olsen, 2003). Dagli und Reichardt (2002) beschrieben diese auf Metaebene. Dazu zählten u.a. die zeitliche Motivation als auch die persönliche Motivation (z.B. sich regelkonform zu verhalten oder persönliche Vorlieben) oder eine „Navigations“-Motivation, von A nach B zu kommen. Den Motivationen sind Ziele auf Verhaltensebene untergeordnet wie beispielsweise bezogen auf die zeitliche Motivation, immer

rechts zu fahren oder zu überholen, wenn dies möglich ist. Lee et al. (2004) identifizierte elf Gründe für einen Fahrstreifenwechsel. Eine Übersicht wird nachfolgend in Tabelle 6 geliefert.

Tabelle 6. Übersicht über Gründe für einen Fahrstreifenwechsel (übersetzt aus dem Englischen aus Lee et al., 2004)

Fahrstreifenwechseltyp	Beschreibung
Langsames Vorderfahrzeug	Spurwechsel um ein Fahrzeug zu passieren, das sich langsamer als die vom eigenen Fahrzeug (EGO) bevorzugte Geschwindigkeit bewegt.
Rückkehr	Spurwechsel um auf die bevorzugte Fahrspur zurückzukehren.
Einfahrt	Spurwechsel wegen Einfahrt in eine Straße.
Ausfahrt	Spurwechsel wegen Ausfahrt aus einer Straße.
Drängeln	Der Folgefahrer fährt dicht auf / nähert sich mit höherer Geschwindigkeit.
Einscherendes Fahrzeug (E)	Das einscherende Fahrzeug bewirkt einen Spurwechsel des F.
Hindernis	Manöver zum Umfahren eines Hindernisses.
Spurwegfall	Die Spur verringert sich (z.B. von 3 auf 2 Spuren).
Zusatzspur	Erweiterung um eine weitere Spur.
Unabsichtlich	Unabsichtliches Abweichen aus der Spur (z.B. bedingt durch Unaufmerksamkeit).

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Typ „Langsames Vorderfahrzeug“. Das Anwendungsszenario stellt ein Fahrzeug im Niedriggeschwindigkeitsbereich dar, das von der langsamen rechten Spur vor ein Vorderfahrzeug auf die mittlere, schnellere Spur wechseln möchte. Der Grund für die Wahl dieses Szenarios liegt darin, dass in diesem Fall kooperatives Verhalten notwendig ist, um einen sicheren Fahrstreifenwechsel durchführen zu können.

2.4.4 Phasen des Fahrstreifenwechsels

Fahrstreifenwechselmodelle lassen sich in Modelle gliedern, die zum einen den Ablauf beschreiben, zum anderen die dahinterliegenden kognitiven Modelle (vgl. Henning, 2010; Salvucci, 2006). Eine Übersicht liefert hierzu Michon (1985). Er unterscheidet hier zwischen verhaltensorientierten und motivationsorientierten Modellen. Zusätzlich unterteilt er des Weiteren diese Modelle in taxonomisch (d.h. Systeme, die dynamische Prozesse inkludieren) und funktional. Da hier eine Grundlage für die Entwicklung eines Algorithmus entworfen werden soll, wird der Fokus auf verhaltensbasierte Modelle gelegt, die im Folgenden ausführlicher beschrieben werden sollen. Ehmanns (2003) differenziert vier Bereiche. Im ersten Schritt erfolgt die Entscheidung für eine bestimmte Lücke. Dies geht über in ein Beschleunigungsverhalten nach vorne. Der nachfolgende Schritt gliedert sich in lateralen Querversatz und Übergang zur Folgefahrt. Der letzte Schritt ist gegebenenfalls eine Geschwindigkeitsanpassung. Van Winsum et al. (1999) unterscheiden drei Phasen basierend auf den Lenkbewegungen: In der ersten Phase wird das Lenkrad bis zum für den Spurwechsel

nötigen maximalen Lenkradeinschlagswinkel gedreht. Danach wird das Lenkrad in die entgegengesetzte Richtung gedreht. Die zweite Phase endet, wenn sich die Richtung des Fahrzeuges bezüglich der Fahrbahnorientierung nicht mehr weiter ändert, das in der Regel in dem Moment eintritt, in dem der Lenkradwinkel auf Null Grad geht. In der dritten Phase wird das Lenkrad auf einen zweiten maximalen Lenkradeinschlagswinkel in entgegengesetzter Richtung gedreht, um das Fahrzeug in der neuen Spur zu stabilisieren.

Fastenmeier et al. (2001) gliedert den Spurwechsel in vier Phasen mit dahinterliegenden Aktivitäten. In Tabelle 7 werden diese dargestellt. Zusätzlich sind die im Fahrstreifenwechselszenario relevanten Parameter, den Phasen entsprechend gelistet.

Tabelle 7. Phasen des Fahrstreifenwechsels (in Anlehnung an Fastenmeier et al., 2001)

Phasen des Fahrstreifenwechsels				
	Entscheidung	Vorbereitung	Durchführung	Abschluss
Aktivitäten	<ul style="list-style-type: none"> • Entscheidung aufgrund unterschiedlicher Motive: Schnellere Spur, Baustelle usw. • Prüfung der Legalität • Prüfung der Durchführbarkeit: Zeigen von Sicherungsverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Signalisieren der Absicht (Blinkersetzung, Querversatz) • Herstellen der erforderlichen Geschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherungsverhalten • Querversatz • Geschwindigkeitsanpassung 	<ul style="list-style-type: none"> • Neu-positionierung in der angrenzenden Spur • Beenden der Signalsetzung • Ggf. Anpassung der Geschwindigkeit
Relevante Parameter	<ul style="list-style-type: none"> • THW, TTC zwischen dem Einscherer und dem Folgefahrer • Verzögerung und Beschleunigung des Folgefahrers 	<ul style="list-style-type: none"> • Blinkersetzung • Querversatz • Verzögerung, Beschleunigung • Spurwechseldauer des Einscherers 	<ul style="list-style-type: none"> • Spurwechseldauer des Einscherers 	<ul style="list-style-type: none"> • THW zwischen dem Folgefahrer und Einscherer

Für diese Arbeit ist die Vorbereitungs- bzw. der Beginn der Durchführungsphase von Interesse, da sich in dieser Phase entscheidet, ob ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt werden kann. Dieser spielt sich meist in einem Zeitraum 3 s vor dem eigentlichen Fahrstreifenwechsel ab (Morris, Doshi, & Trivedi, 2011).

2.4.5 Parameter im Fahrstreifenwechselszenario

Der Fahrstreifenwechsel für den Anwendungsfall des Einscherens vor einen Folgefahrer auf der Autobahn im Niedriggeschwindigkeitsbereich (Bascunana, 1995) wird durch zwei Perspektiven charakterisiert:

Das Fahrverhalten des Fahrers, der den Fahrstreifen wechseln will, als auch das Fahrverhalten des reagierenden Folgefahrers auf der Zielspur, der zunächst einem anderen Vorderfahrer folgt.

Beide Perspektiven des Fahrverhaltens sind durch bestimmte Parameter gekennzeichnet, die unterschiedliche Assoziationen hervorrufen können (siehe Kap. 2.1.1 Merkmale kooperativen Verhaltens des Fahrstreifenwechsels). Aufgrund dessen sollen die in einen Fahrstreifenwechsel relevanten Parameter des Verhaltens (aus Folgefahrer– und Einschererperspektive) beschrieben werden. Da im Methodenteil für die Parametrierung der unabhängigen Variablen insbesondere der Wertebereich wichtig ist, in dem sich die Parameter bewegen, werden auch diese näher beschrieben. Im Folgenden werden die Parameter entsprechend beider Perspektiven einer genaueren Betrachtung unterzogen.

Relevante Parameter während des Spurwechsels

Das Spurwechselverhalten des Einscherers wird durch bestimmte Parameter charakterisiert, von denen im Folgenden diejenigen beschrieben werden sollen, die für diese Arbeit relevant sind.

Fahrstreifenwechseldauer t_{SE}^E

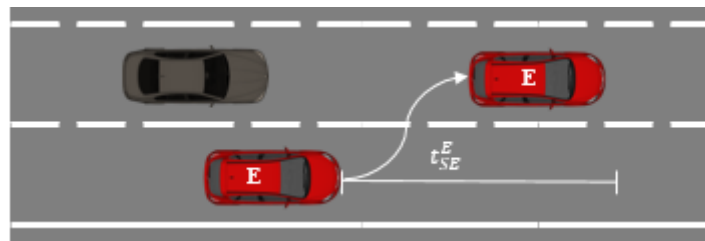


Abbildung 8. Grafische Darstellung der Fahrstreifenwechseldauer.

Die Fahrstreifenwechseldauer wird unterschiedlich definiert (siehe hierzu auch die Definition eines Fahrstreifenwechsels Kap. 2.4.1., Abbildung 8). Allgemein beschrieben ist es die Dauer zwischen der Initialisierung (durch einen Querversatz) bis zur Beendigung des Spurwechsels durch den Einscherer (E), wenn das Fahrzeug vollständig in der neuen Spur lokalisiert ist. Ehmanns (2003), definiert den Fahrstreifenwechsel ab dem Zeitpunkt, in dem das Rad des Vorderfahrzeuges die Spurmarkierung berührt. In seiner Studie fand er heraus, dass durchschnittliche Fahrstreifenwechseldauern von rechts nach links in etwa 1.9 s und von links nach rechts 2.6 s betrugen. Er erklärte dies damit, dass Spurwechsel nach links mit höheren Anforderungen einhergehen, da meist auf die schnellere Spur gewechselt wird und Geschwindigkeiten heranfahrender Folgefahrer mitberücksichtigt werden müssen. Aufgrund der unterschiedlichen Definitionen finden sich Fahrstreifenwechseldauern zwischen 1.0 s - 13.3 s (Thiemann, Treiber, & Kesting, 2008; Toledo, Koutsopoulos, & Ben-Akiva, 2009). Finnegan und Green (1990) berichten von Zeitdauern zwischen 4.9 s und 6.7 s mit visueller Suche, Hetrick (1997) dagegen zwischen 3.4 s und 13.6 s. In der Literatur finden sich

emotionale Assoziationen mit einer kurzen Spurwechseldauer, meist in Verbindung mit einem knappen Einscheren vor einem Folgefahrer in einer Spurwechselsituation, als Ausdruck eines aggressiven Fahrstils (Scott-Parker, Jones, Rune, & Tucker, 2018; Tasca, 2000).

Time to Collision (TTC^{FE})

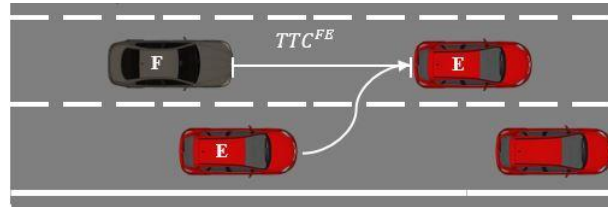


Abbildung 9. Grafische Darstellung der Time to Collision.

Die Time to Collision (siehe Abbildung 9) ist definiert als die Zeit, in der zwei Fahrzeuge kollidieren, wenn sie mit ihrer momentanen Geschwindigkeit auf dem gleichen Weg weiterfahren (Hayward, 1971).

Sie wird auch Time to Arrival (TTA) bzw. Time to Contact genannt (Schleinitz, Petzoldt, & Krems, 2015). Die TTC kann zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen werden. Da es in dieser Arbeit um die Phase der Fahrstreifenwechselankündigung, geht wird die TTC für das Einscherszenario als Distanz zwischen dem Folgefahrzeug F und dem einscherenden Fahrzeug E, dividiert durch die Relativgeschwindigkeit der beiden Fahrzeuge ($= TTC^{FE}$). Diese muss jedoch größer Null sein, um einen Zusammenstoß zu verhindern (Van Winsum & Heino, 1996). Die Wahl der TTC beim Einscheren (Gap Acceptance) erstreckt sich in einem Wertebereich zwischen 4.5 s bis 9.3 s (Alexander, Barham, & Black, 2002). Die große Spannweite ist dadurch begründet, dass die Wahl von verschiedenen Faktoren abhängig ist, von denen einige im Folgenden dargestellt werden sollen. Zu diesen Faktoren zählen die Verkehrsdichte (Stern, 1999) und der Zeitdruck (Matthews, Dorn, & Glendon, 1991).

Auch die Fahrzeuggröße hat einen Einfluss auf die Spurwechselentscheidung. Alexander et al. (2002) konnte zeigen, dass Fahrer weniger bereit waren, vor einem LKW als vor einem PKW einzuscheren. Die Lücke, die bei LKW akzeptiert wurde, belief sich auf 9.1 s im Vergleich zu PKW mit 8.8 s. Die Autoren wiesen zusätzlich auf einen Alterseinfluss hin. So bevorzugten ältere Menschen größere Lücken (8.7 s) als Jüngere (7.9 s). Nach Hwang und Park (2005) findet sich ein linearer Anstieg der Lückengröße zur Relativgeschwindigkeit. Ashworth und Bottom (1977) untersuchten, wie sich die Wartezeit auf die Lückenwahl auswirkte. Bei Wartezeiten über 8 s wurden Lücken der Größe 4 s akzeptiert im Vergleich zu 4.9 s bei Wartezeiten unter 8 s. Ehmanns (2003) fand im Realverkehr Zeitlücken von ca. 0.9 s zum Folgefahrer. Der Vergleich von Spurwechseln nach rechts und links ergibt, dass diese nach rechts mit kleineren Werten einhergehen.

Wie schon bei der Fahrstreifenwechseldauer beschrieben, wird eine knappe TTC^{FE} als aggressives Einscheren interpretiert (Scott-Parker, Jones, Rune, & Tucker, 2018; Tasca, 2000). Ehmanns (2003) hebt beim kooperativen Fahren, die Eindeutigkeit hervor. So definiert sich nach ihm ein kooperativer Spurwechsel durch Blinkersetzung und einer größeren Time to Collision zum Folgefahrer auf der Zielspur.

Hinsichtlich der durchschnittlichen Lückengröße, konnten unterschiedliche Ergebnisse in Abhängigkeit der Fahrerfahrung gefunden werden. So zeigte Ehmanns (2003), dass erfahrene Fahrer in kleinere Lücken von $\Delta d = 14$ m bis 17 m einscherten, wohingegen unerfahrene Fahrer Lücken von 23 m bevorzugten. Eine weitere wichtige Größe ist der Verkehrszustand. Je höher die Verkehrsdichte desto kleiner sind die Lücken, die akzeptiert werden (Gurupackiam & Jones, 2011). Hwang und Park (2005) fanden im gestauten Verkehr kritische Lückengrößen zum Folgefahrer von 29 m.

Geschwindigkeit

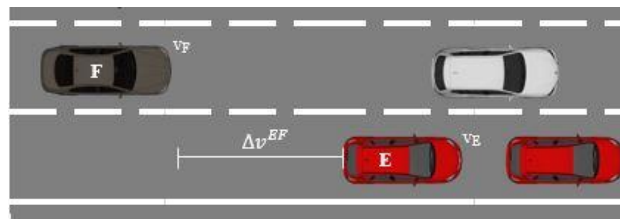


Abbildung 10. Grafische Darstellung der Differenzgeschwindigkeit.

In dieser Arbeit ist die Differenzgeschwindigkeit zwischen Folgefahrer und Einscherer von Interesse Δv_{Quer}^{EF} (siehe Abbildung 10). Die Geschwindigkeiten zu anderen Verkehrsteilnehmer werden gut eingeschätzt. Das dahinterliegende Konstrukt ist die TTC. Die Schätzung der TTC wird von der Beobachtungsdauer beeinflusst. So berichteten Hoffmann und Mortimer (1994), dass eine längere Beobachtungsdauer mit einer besseren Einschätzung der TTC einhergeht. Ein anderer Faktor ist die Geschwindigkeit, mit der sich ein anderes Fahrzeug nähert. So konnte in Studien aufgezeigt werden, dass bei Zunahme der Geschwindigkeit die Akzeptanz von kleineren Lücken stieg (Alexander et al., 2002; Yan, Radwan, & Guo, 2007). Alexander et al. (2002) verglichen Geschwindigkeiten von 48 km/h mit 98 km/h. Bei 48 km/h wurden im Durchschnitt Lücken mit 9.3 s und bei 98 km/h Lücken mit 6.9 s akzeptiert.

Einige Autoren berichteten, dass je höher die Geschwindigkeiten sind, desto genauer werden die Schätzungen der TTC (Manser, 1999; McLeod & Ross, 1983), der Trend aber nicht linear wäre (McLeod & Ross, 1983). Eine weitere Einflussgröße stellt der Blickwinkel dar. Schiff und Oldak (1990) ließen ihre Probanden die TTC aus frontaler und seitlicher Perspektive einschätzen. Es stellt sich heraus, dass die TTC umso genauer war, je besser das Fahrzeug zu

sehen war. Nach Lee et al. (2004) entscheiden Menschen basierend auf der TTC, wann sie in einem Folgefahrtszenario anfangen müssen zu bremsen (van der Horst, 1990).

Nach Staplin, Lococo, Sim und Gish (1998) gibt es Unterschiede in der Lückenakzeptanz in Abhängigkeit von der wahrgenommenen Differenzgeschwindigkeit und räumlichen Entfernung zwischen einscherendem und Folgefahrer. Ähnliche Ergebnisse fanden Baumann, Steenken, Kassner, Weber und Lüdtke (2011): Bei ansteigender Differenzgeschwindigkeit waren die Teilnehmer, weniger gewillt einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Dies galt auch bei zunehmender Distanz, allerdings nur bis zu einer bestimmten Differenzgeschwindigkeit von 40 km/h. Jula, Kosmatopoulos und Ioannou (1999) unterschieden zwischen subjektiv sicherem und kritischem Bereich hinsichtlich der Differenzgeschwindigkeit. Ab einer Differenzgeschwindigkeit von 20 m/s galt ein Einscherszenario als zu kritisch. Beim Einscheren lassen zeigte sich bei Ehmanns (2003) eindeutiges Fahren durch einen deutlichen Abfall in der Differenzgeschwindigkeit.

Laterale Position d_{Lat}^E

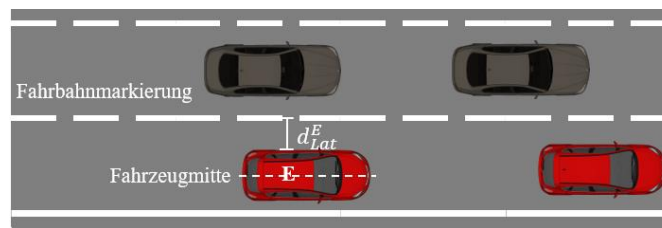


Abbildung 11. Grafische Darstellung der lateralen Position.

Die laterale Position eines Fahrzeuges beschreibt die horizontale Position seiner Längsachse in einer Fahrspur in Bezug auf die Mittelachse der Straße. Anders ausgedrückt ist es die Distanz von der Fahrzeugmitte zur Fahrspurmarkierung (siehe Abbildung 11) und erstreckt sich über einem Wertebereich entsprechend der Fahrbahnbreite. Diese liegt nach der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen in Deutschland zwischen 2.75 m und 3.75 m (FGSV, 1996). Die laterale Position wird nicht nur als ein Maß für die Fähigkeit des Fahrers, die Spur zu halten verwendet, sondern dient als ein relevantes Merkmal in der Spurwechselprädiktion (Savino, 2009). Sie wird meist in einem Zeitraum von drei Sekunden vor einem Fahrstreifenwechsel betrachtet (Rehder, Maas, Louis, & Schramm, 2016a; Olsen, 2003).

Blinkerverhalten d_{Bl}^{FE}

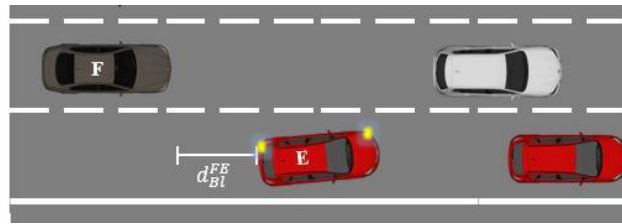


Abbildung 12. Grafische Darstellung des Blinkerverhaltens.

In Deutschland werden laut einer Studie ca. 75% der Fahrstreifenwechsel mit Blinkersetzung angezeigt (Auto Club Europa, 2008, siehe auch Abbildung 12). Der Blinker gilt als aussagekräftigstes Signal, um seinen Spurwechselwunsch anzukündigen (Faw, 2013). Dennoch zeigen Studien auf, dass der Blinker inkonsistent genutzt wird (Ponziani, 2012). Nach Olsen (2003) ist die Nutzung des Blinkers zusätzlich abhängig von der Kritikalität der Situation als auch der Dringlichkeit. So wird in dringenden Situationen der Blinker weniger oft genutzt. Faw (2013) untersuchte Einflussfaktoren auf das Blinkverhalten. Seine Studie zeigte, dass Menschen den Blinker signifikant weniger benutzen, wenn sie nach rechts abbiegen, bei höherer Verkehrsdichte oder wenn das Vorderfahrzeug ebenfalls den Blinker nutzt. Auch die Verkehrsdichte oder Anwesenheit anderer Fahrzeuge gilt als Einflussfaktor. So wird der Blinker öfter bei anwesendem Verkehr genutzt als bei keinem Verkehr (Lebbon, Austin, Van Houten, & Malenfant, 2007). Faw (2003) betont vor allem die Blinkersetzung als wichtigstes Mittel, um eine eindeutige positive Botschaft zu senden. In einer Realverkehrsstudie von Ehmanns (2003) wurden bei 53 Spurwechsel 86% der Spurwechsel mit Blinkersetzung angekündigt.

Hetrick (1997) fand heraus, dass in den Situationen, in denen der Blinker gesetzt wurde, dies im Schnitt zwischen -2.4 s bis 3.6 s dauerte, wobei negative Werte implizierten, dass der Blinker vor dem Spurwechsel gesetzt wurde. Ähnliche Ergebnisse bzgl. der Blinkersetzung vor dem Spurwechsel zeigten sich bei Beggiato und Krems (2013). In der Forschung wird das fehlende Setzen eines Blinkers mit aggressivem Verhalten assoziiert (Hidas, 2002; Tasca, 2000).

Blickverhalten

Fahrer zeigen vor und während des Spurwechsels ein Sicherungsverhalten. Dies zeigt sich u.a. an den Orten der Blickfixation und der Fixationsdauer. Für diese Arbeit ist die Zeitspanne vor der Spurwechseldurchführung relevant. Für den umliegenden Verkehr äußert sich das Sicherungsverhalten des potentiellen Einscherers entweder in Form von Kontaktaufnahme oder in Form einer Zeitspanne, in der der Fahrer noch auf seiner eigenen Spur verweilt, was hier als Verweilzeit betitelt werden soll.

Robinson, Erickson, Thurstone und Clarke (1972) untersuchten das visuelle Suchverhalten, basierend auf Kopfbewegungen während eines Spurwechsels nach links und rechts auf der Autobahn. Sie fanden heraus, dass die Fahrer ein längeres visuelles Suchverhalten nach links als nach rechts zeigten. Blicke in den Spiegel dauerten im Durchschnitt 0.6 s bis 1.7 s, während Schulterblicke 0.8 s bis 1.0 s dauerten. Mourant und Donohue (1974) untersuchten die gesamte Blickzeit während des Spurwechsels nach links. Sie kamen auf 2.4 s, bestehend aus 1.38 s Blickdauer in den linken Spiegel, 0.76 s in den inneren Spiegel und einer Kopfbewegung. Ein anderer Faktor, der sich auf das Blickverhalten auswirkt, ist die Fahrerfahrung (Mourant & Rockwell, 1972) und der Fahrerzustand (Hanowski et al., 2000). Eine längere Verweilzeit kann von dem umliegenden Verkehr auch als Unsicherheit gedeutet werden und zeigt sich meist bei Fahranfängern (Ellinghaus, 1986).

Relevante Parameter während der Folgefahrt

Der Folgefahrer kann auf einen Einscherer durch beschleunigen, verzögern, konstanter Weiterfahrt oder ausweichen durch entsprechenden Lenkbewegungen reagieren. Da der Fokus dieser Arbeit auf kooperatives Verhalten gelegt wird ist die Verzögerung, Reaktionszeit, Umfang der Geschwindigkeitsreduktion und Time Headway relevant.

Verzögerung und Beschleunigung (a^F, a^E)

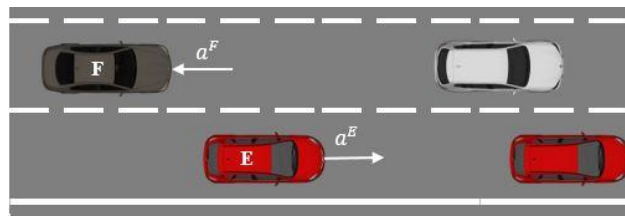


Abbildung 13. Grafische Darstellung der Verzögerung/ Beschleunigung.

Ein Verzögerungs-, Beschleunigungsbeginn in der Literatur wird je nach Situation und Verfügbarkeit der Daten unterschiedlich definiert (siehe auch grafische Darstellung in Abbildung 13). Summala (2014) maß den Start der Verzögerung zum Zeitpunkt der Bremspedalbetätigung. Analog hierzu kann die Beschleunigung durch Betätigung des Gaspedals gemessen werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin sich anhand eines bestimmten Grenzwertes für die Verzögerung zu orientieren (siehe hierzu auch das Unterkapitel Bremsreaktionszeit). Ehmanns (2003) fand Verzögerungen im dichten Verkehr zwischen -0.5 m/s^2 bis -1.5 m/s^2 . Treiber (2007) verwendet in seinem Spurwechselmodell MOBIL Verzögerungen bis zu -4 m/s^2 . Ahmed (1999) betrachtete das Verzögerungsverhalten und Spurwechselverhalten von Fahrern im dichten Verkehr und fand Verzögerungen zwischen

-0.6 m/s² und -1.6 m/s² in Abhängigkeit von Geschwindigkeitsdifferenz, THW und Verkehrsdichte. Dies konnte von Ammon (2013) mit Verzögerungen < 2.5 m/s² bestätigt werden. In der Literatur (Ellinghaus, 1986; Maag, 2004) wird Verzögern als kooperativ beim Folgefahrer erachtet, während eine konstante Weiterfahrt bzw. ein Beschleunigen als unkooperativ gedeutet wird.

Spurwechsel gehen mit einer quer- und longitudinalen Beschleunigung einher. Deswegen sollen diese hier kurze Erwähnung finden.

In Abhängigkeit von der Umgebung zeigen sich unterschiedliche Spannweiten an Quer- und longitudinale Beschleunigung des Fahrzeuges. So finden sich auf der Autobahn Querbeschleunigungen < 2 m/s², während bei Landstraßen Querbeschleunigungen von 3 m/s²-4 m/s² gefunden werden (Ammon, 2013). Longitudinale Beschleunigungen befinden sich in einem Bereich von < 1.7 m/s² (Ammon, 2013). Dieser Parameter steht vor allem in Bezug zu Fahrkomfort. So werden longitudinale Beschleunigungen von 1 m/s² bis 1.47 m/s² als komfortabel empfunden (Kilinç & Baybura, 2012).

Umfang der Geschwindigkeitsreduktion (Δv)

Das Abbremsen, mit dem Ziel einen Einscherer einfädeln zu lassen geht neben der Reaktionszeit und der Verzögerung auch mit einem Geschwindigkeitsabbau einher. Indirekt definiert dieser Umfang der Geschwindigkeitsreduktion die Dauer, für wie lange die oben beschriebene Verzögerung angewandt wurde. In der Literatur werden weniger explizit Werte, sondern mehr die Beschreibung des Parameters (Green, 2000; Gerlough & Huber, 1975) gefunden. Näheres findet sich im Unterkapitel Reaktionszeit.

Reaktionszeit (t)

Die Reaktionszeit bezogen auf den Bremsvorgang wird in der Literatur unterschiedlich und je nach Situation definiert, was in Abbildung 14 verdeutlicht werden soll.

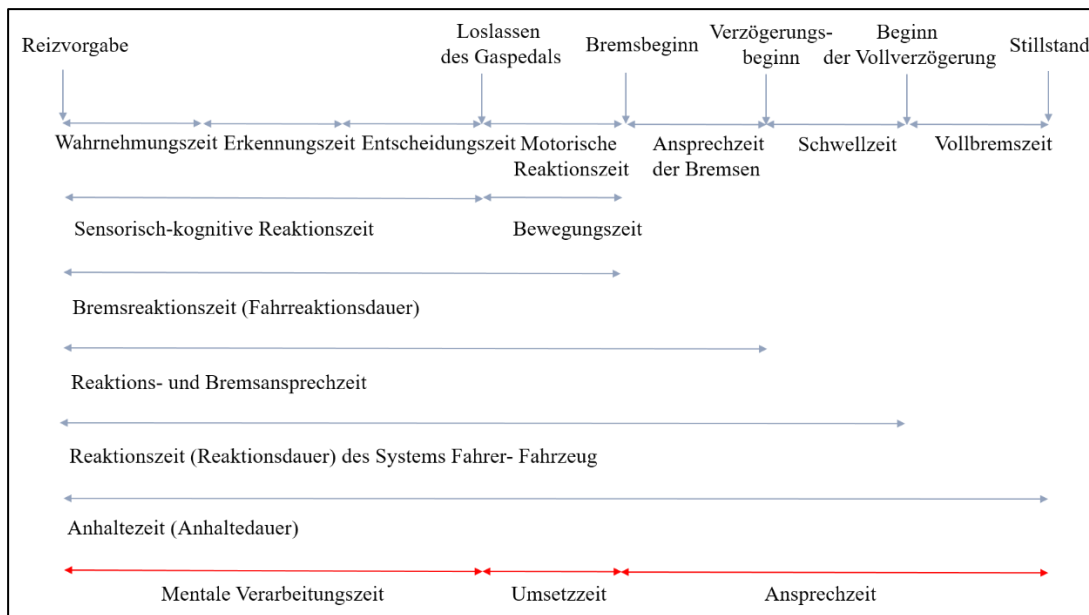


Abbildung 14. Bremsreaktionszeiten (Quelle: Klebelsberg (1982, S.82) und Green (2000))

Barrett (1968) untersuchte die Zeitspanne vom ersten Kontakt bis zum vollen Durchdrücken des Bremspedals und bis zum Stillstand. Die Werte befanden sich zwischen 0.5 s und 1.0 s, wobei manche Fahrer das Bremspedal nie ganz durchdrückten.

Die Reaktionszeit wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Insbesondere die Tatsache, dass ein Ereignis erwartet wird, hat darauf starke Auswirkungen. Die Literatur bzgl. Reaktionszeit von erwarteten Ereignissen zeigt Werte um 0.6 s für erwartete Ereignisse (Korteling, 1990) bis 1.4 s (Van Winsum & Brouwer, 1997) und 1.2 s für überraschende Ereignisse (Green, 2000). Daraus schlussfolgerte Green (2000), dass die Reaktionszeit für unerwartete Ereignisse länger ist als die für erwartete. Andere Faktoren sind Alter, Geschlecht und Dringlichkeit (Green, 2000), aber auch Beschleunigungsverhalten des Vordermanns (Gerlough & Huber, 1975). Ahmed (1999) weist jedoch darauf hin, dass die Reaktionszeiten auch in Relation zur Beschaffenheit des Fahrzeugs (z.B. Stärke der Bremsen) stehen. Ehmanns (2003) findet in seiner Realfahrtstudie Reaktionszeiten im dichten Verkehr von 1.0 s bis 2.0 s bei Ankündigungen des Spurwechselwunsches durch Blinkersetzung bzw. bis zu 7.0 s bei fehlender Ankündigung. Ahmed (1999) findet Reaktionszeiten von 1.1 s und 2.0 s im Realverkehr.

Time Headway (THW^{FV})

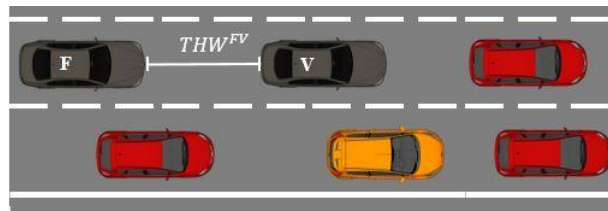


Abbildung 15. Grafische Darstellung der Time Headway.

Die Time Headway ist das Zeitintervall zwischen zwei Fahrzeugen in einem Folgefahrtszenario (siehe Abbildung 15). Wenn das Folgefahrzeug (F) und das Vorderfahrzeug (V) mit der gleichen Geschwindigkeit fahren (stationäres Folgen), stellt die THW die Zeit dar, die dem Fahrer des nachfolgenden Fahrzeugs zur Verfügung steht, um die gleiche Verzögerung wie das Führungsfahrzeug zu erreichen, falls es bremst (Evans, 1991; Van Winsum & Heino, 1996). Nach Evans (1991) sollte ein Sicherheitsabstand von 2 Sekunden THW eingehalten werden, auch bekannt als die 2 s Regel. In Deutschland spricht man von einem „halben Tacho“ als minimaler Sicherheitsabstand, was umgerechnet einer THW von 1.8 s entsprechen würde (Vogel, 2003). Ohta (1993) unterscheidet verschiedene Sicherheitszonen. Die normale Fahrzone weist eine THW zwischen 1.1 s und 1.7 s zum Vorderfahrzeug auf. Viele halten diesen Abstand, um zu verhindern, dass andere vor ihnen einscheren (Fancher et al., 1998; Ferrari, Cascetta, Nuzzolo, Treglia, & Olivotto, 1984). Die kritische Zone liegt zwischen 0.6 s und 1.1 s und die Gefahrenzone kleiner 0.6 s. In dieser Zone empfindet der Fahrer ein Gefühl von Gefahr, dass er mit dem Vordermann zusammenstoßen könnte. Ein Abstand größer 1.7 s ist die „Pursuit Zone“. Diese wird von vielen Fahrern als unkomfortabel betrachtet, weil sie sich nach Ohta (1993) außerhalb der sozialen Norm befindet. Die normale Fahrzone stimmt weitgehend mit den Ergebnissen anderer Autoren überein. In der Literatur finden sich THW zwischen 1.5 s und 2.0 s auf Autobahnen, die die Fahrer als angenehm empfunden haben. Geringere Abstände darunter wurden als unangenehm erachtet (Ayres, Li, Schleuning, & Young, 2001; Lewis-Evans, De Waard, & Brookhuis, 2010; Siebert, Oehl, & Pfister, 2014). Kleine THWs zum Vorderfahrer gelten als riskantes Fahrverhalten (Evans & Wasieleski, 1983). Ein Nahes auffahren wird von dem Vorderfahrer als drängeln bzw. als aggressiv erlebt (Tasca, 2000).

Ziel dieses Kapitels war es die relevanten Größen in der Fahrstreifenwechselsituation aus Einscherer- als auch Folgefahrerperspektive aufzuzeigen bzw. darzustellen, wie diese vom Folgefahrer wahrgenommen und bewertet werden. Zusätzlich diente das Aufzeigen des Wertebereichs der einzelnen Parameter dazu die Basis für die Parametrierung der unabhängigen

Variablen in den Studien im Methodenteil zu bilden. Diese Parameter haben je nach Situation eine andere Gewichtung für den Fahrer. Davon macht er seine Entscheidung abhängig, bestimmte Manöver durchzuführen. Mit diesem Thema beschäftigt sich die Objektprädiktion, die im nächsten Kapitel kurz beleuchtet wird.

2.5 Objektprädiktion – Indikatoren in einer Fahrstreifenwechselsituation

Die Grundlage, für kooperatives Verhalten im Straßenverkehr, ist die Erkennung der Intention des Interaktionspartners (Benmimoun et al., 2004; Paternotte, 2014). Diese ist zum einen von bestimmten Parametern abhängig, wie beispielsweise die Blinkersetzung beim Fahrstreifenwechsel, zum anderen von der Stärke des Parameters. In Kap. 2.2 wurde die Eindeutigkeit als Konstrukt aus psychologischer Sicht bereits beleuchtet. Hier wurde die Eindeutigkeit eines Reizes mit der Stärke der Wahrnehmbarkeit eines Reizes gleichgesetzt. In diesem Abschnitt soll darauf eingegangen werden, welche Parameter als relevant erachtet werden, um eine Intention des anderen Fahrers vorhersagen zu können.

Wissenschaftler, die sich mit automatisierten Fahrzeugen beschäftigen, greifen zur Lösung der Parameterauswahl auf Methoden der Objektprädiktion zurück. In einer Fahrstreifenwechselsituation befasst sich die Intentionserkennung mit der Modellierung von Prädiktionen mit verschiedenen Ansätzen wie maschinellem Lernen (Dogan et al., 2008; Rehder et al., 2016a). Diese geben Aufschluss darüber, welche Parameter im Fahrstreifenwechselszenario die höchste Vorhersagekraft haben, um die Intention für ein bestimmtes Manöver zu präzisieren. Dementsprechend wird sowohl auf die wichtigsten Merkmale aus der Perspektive des Einscherers als auch aus der Perspektive des auf einen Einscherer reagierenden Folgefahrers eingegangen.

Objektprädiktion aus der Perspektive des Folgefahrers

Indikatoren für einen Fahrstreifenwechsel können in zwei Bereiche eingeteilt werden. Fahrdaten- und personenbezogene Indikatoren:

Indikatoren, die personenbezogen und für die umliegenden Verkehrsteilnehmern teilweise schwer ersichtlich sind, stellen das Blickverhalten des Einscherenden (Henning, Schweigert, Baumann, & Krems, 2012) oder die Kopfbewegung (Cheng & Trivedi, 2006) dar. Dieses Sicherungsverhalten lässt sich vom umgebenden Verkehr daran erkennen, dass auf der eigenen Fahrspur nach Blinkersetzung länger verweilt wird (Fastenmeier et al., 2001). Weitere Indikatoren sind die Gas- und Bremspedalposition (McCall, Wipf, Trivedi, & Rao, 2007) oder der Lenkradwinkel (Liu & Pentland, 1997).

Bezogen auf die Fahrdaten unterscheiden Rehder et al. (2016a) zwischen reaktiver und proaktiver Manövererkennung, wenn es um eine Spurwechselprädiktion geht. Unter reaktiver Manövererkennung wird die Erkennung eines Fahrstreifenwechsels anhand des Fahrverhaltens erkannt, während die proaktive Manövererkennung sich aus der Situation erschließt, zum Beispiel bei einem langsam voranfahrenden Lastwagen.

In diesem Kontext soll der Fokus auf die reaktive Manövererkennung gelegt werden.

Ein Indikator für einen Fahrstreifenwechsel wäre der Blinker. Dieser wird von 75 % der Autofahrer in Deutschland eingesetzt (Auto Club Europa, 2008). Zusätzlich wird in der Straßenverkehrsordnung explizit darauf hingewiesen, diesen zu nutzen, wenn ein Fahrstreifenwechsel initiiert werden soll. Andere Autoren identifizierten als relevante Parameter gerade für die Fahrstreifenwechselankündigung den Querversatz (Popescu & Nedevski, 2012; Mandalia & Salvucci, 2005; McCall, Wipf, Trivedi, & Rao, 2007; Dagli, Breuel, Schittenhelm, & Schanz, 2004) oder die TLC (Time to Line Crossing) (Lee, Kwon & Lee, 1999). Ein weiterer Parameter, der in diesem Zusammenhang eine Rolle spielt, ist die Beschleunigung, wenn beispielsweise auf eine schnellere Fahrbahn gewechselt wird (Dagli, Brost, & Breuel, 2003; Liu & Pentland, 1997; Mandalia & Salvucci, 2005).

Objektprädiktion aus der Sicht des Einscherers

Fahrer können unterschiedlich auf Einscherer reagieren, was die Längs- und Querführung betrifft. Forscher, die sich damit beschäftigten, wie Fahrer auf plötzliche Einscherer reagieren (Adams, 1994; Hu et al., 2017; Venkatraman, Lee, & Schwarz, 2016), fanden folgende Strategien: In der Längsführung entspricht dies dem Bremsen oder Beschleunigen und in der Querführung Ausweichen durch eine entsprechende Lenkbewegung. Andere Möglichkeiten wären eine Kombination aus beiden Strategien der Quer- und Längsführung. Es zeigte sich dennoch, dass Fahrer tendenziell eher reagieren, indem sie bremsen oder beschleunigen, als ausweichen. Indikatoren, die genutzt werden, um beurteilen zu können, ob ein Fahrstreifenwechsel möglich ist, ist die Erkennung der relativen lateralen Position bzw. Geschwindigkeit des Folgefahrers zum Egofahrer bzw. seine Verzögerung oder Beschleunigung auf der Ziellinie oder auch die Lückengröße (Jula, Kosmatopoulos, & Ioannou, 1999). Ein weiterer Indikator stellt die Distanz zwischen dem einscherenden und dem Folgefahrzeug dar (Tsung-Ying Sun, Shang-Jeng Tsai, Jiun-Yuan Tseng, & Yen-Chang Tseng, 2005).

Die Erkenntnisse der Objektprädiktion können als Basis für die Auswahl der Parameter in den Studien im Methodenteil genutzt werden, wenn das Fahrstreifenwechselszenario einer genaueren Betrachtung unterzogen wird.

2.6 Verwandte Literatur

In der Literatur finden sich kaum Studien zur kooperativen Interaktion zwischen menschlichen Fahrern und automatisierten Fahrzeugen. Verwandte Felder fallen in den Bereich Kooperation zwischen Insasse und Fahrzeug (Ammoun, Nashashibi, & Laugeau, 2007; Li, Wang, & Kim, 2005; Walch et al., 2016) oder Kooperation zwischen autonomen Fahrzeugen (Awal, Murshed, & Ali, 2015; He, Sun, Zhao, & Cheng, 2018; Khan, Basaras, Schmidt-Thieme, Nanopoulos, & Katsaros, 2014; B. Li et al., 2018; B. Li, Zhang, Ge, Shao, & Li, 2017). Ein verwandtes Forschungsfeld, nämlich die Interaktion zwischen Fußgängern und automatisierten Fahrzeugen, soll hier näher beschrieben werden, da in dieser Arbeit eine ähnliche Vorgehensweise gewählt wird, um Erkenntnisse für die Interaktion zwischen menschlichen und automatisierten Fahrzeugen zu gewinnen.

Studien in diesem Bereich lassen sich zum einen unterteilen in die Forschung über das Kooperationsverhalten zwischen Menschen und darauf basierenden Ableitungen für die Interaktion zwischen einem autonomen Fahrzeug und menschlichen Verkehrsteilnehmern. Der Grundgedanke dahinter ist, autonomen Systemen informelle Kommunikationsmuster des Menschen beizubringen. Zudem gibt es Studien, die sich mit der direkten Interaktion zwischen autonomen Fahrzeugen und Verkehrsteilnehmern auseinandersetzen. Zum ersten Bereich gehören die Studien von Witzlack et al. (2016). Diese analysierten zuvor aufgenommenes Videomaterial von einem Parkplatzgelände mit hoher Interaktionsrate zwischen Fußgängern und Autofahrern und kategorisierten anschließend das Verhalten der Fußgänger und der Autofahrer. Daraus konnten, anhand von Kopf- und Gehbewegung, Typen von Fußgängern identifiziert werden, die unterschiedliches Absicherungsverhalten zeigten. Die Autoren schließen, dass diese Zusatzinformation in der Gestaltung von Human Machine Interface (HMI) Lösungen genutzt werden kann, wenn es um die Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen und Fußgängern geht. Beggiato et al. (2016) untersuchten einen ähnlichen Kontext. Sie erforschten ebenfalls in einem Parkszenario die informelle Kommunikation und wollten herausfinden, wann das Fahrzeug optimalerweise anfangen sollte zu bremsen, damit sich der Fußgänger komfortabel genug fühlt, die Straße zu überqueren. Dabei wurden die Geschwindigkeit, das Alter und die Fahrzeuggröße variiert. Er fand heraus, dass es keine universelle Lösung gibt und je nach Faktor andere Präferenzen gesetzt werden. Wie im oberen

Abschnitt bereits erwähnt zielen Studien auch auf die direkte Interaktion zwischen automatisierten Fahrzeugen und Verkehrsteilnehmern ab (Habibovic, Andersson, Nilsson, Lundgren, & Nilsson, 2016; Keferböck & Riener, 2015; Wilbrink & Schieben, 2016).

Eine Möglichkeit, die Interaktion mit Verkehrsteilnehmern und autonomen Fahrzeugen zu untersuchen, bieten *Wizard of Oz Fahrzeuge*. Diese suggerieren dem umgebenden Verkehr, dass sie selbstfahrende Autos wären, werden aber tatsächlich von Fahrern gefahren. Rothenbücher, Li, Sirkin, Mok und Ju (2016) untersuchten damit die Interaktion zwischen Fußgängern und angeblich fahrerlosen Fahrzeugen. Diese Studie gab vor allem über das Reaktionsverhalten und den Erwartungshaltungen gegenüber derartigen Fahrzeugen Aufschluss. Andere Autoren fokussieren sich auf visuelle und auditive Lösungen, die die Kommunikation mit dem Menschen in Form von visuellen oder auditiven Signalen abbilden sollen (Habibovic, Andersson, Lundgren, Klingegård, & Englund, 2017).

Dieses Kapitel beschreibt ein verwandtes Gebiet, da es meines Wissens keine Literatur gibt, die inhaltlich denselben Sachverhalt wie in dieser Arbeit beschreibt. Diese Arbeit orientiert sich an der Vorgehensweise, die gewählt wurde um Interaktionen zwischen Fußgängern und autonomen Fahrzeugen zu untersuchen. Basierend auf menschlichem Interaktionsverhalten sollen Erkenntnisse generiert werden, wie ein automatisiertes Fahrzeug mit einem menschlichen Fahrer interagieren soll, um verstanden zu werden.

2.7 Zusammenfassung und Fazit

In der Übergangsphase, in der automatisierte Fahrzeuge mit menschlichen Fahrern auf der Straße koexistieren, ist es wichtig, dass sich das automatisierte Fahrzeug dem menschlichen Verhalten anpasst. Desweiteren ist es wichtig dessen Außenwirkung zu berücksichtigen, da der Hersteller in der Verpflichtung ist in seiner Kommunikation mit den umliegenden Fahrzeugen kein aggressives Außenbild zu vermitteln. Dabei wird der Fokus auf kooperatives Verhalten gelegt, da Fahrverhalten mit einer bestimmten Außenwirkung einhergeht, die kognitive Verzerrungen und Falschinterpretationen mit sich bringen kann, was zu einer Gefährdung der Verkehrsteilnehmer führen kann. Dies soll durch eine als kooperativ empfundene Außenwirkung verhindert werden. In diesem Kontext wird Kooperation als positives, auf einander abgestimmtes Verhalten zwischen zwei Interaktionspartnern verstanden, deren Ziel die Gewährleistung von Sicherheit für beide Parteien darstellt. Kommunikation wird dabei als Mittel zur Verständigung genutzt. Das Modell von Grice (1975) erklärt die Grundvoraussetzung für kooperatives Verhalten: Dies stellt das eindeutige Wahrnehmen und Verstehen der Intention des Interaktionspartners dar. Das gibt dem Folgefahrer die Möglichkeit zu reagieren. Auch dieser muss dann seine Intention (Kooperation oder nicht) ganz klar

kommunizieren, damit der andere wieder weiß, wie er entsprechend reagieren kann. Damit geht es um klare, eindeutige Kommunikation im Verkehr. Die Basis für eine eindeutige Wahrnehmung liefert aus psychologischer Sicht das SEEV Modell (Wickens et al., 2003) und die Signalentdeckungstheorie (Green & Swets, 1966). Daraus abgeleitet kann gesagt werden, dass bestimmte Merkmale die Aufmerksamkeit auf sich ziehen und zur Interpretation der Situation genutzt werden und die Stärke bzw. Salienz dieser Merkmale bestimmt, wie eindeutig die Situation charakterisiert wird.

Aus technischer Sicht gibt die Objektprädiktion Anhaltspunkte, welche Merkmale vom Menschen als relevant erachtet werden könnten, um Intentionen zu erkennen und darauf basierend Entscheidungen zu treffen.

Der Straßenverkehr ist durch Situationen mit einer erhöhten Interaktion gekennzeichnet, in der menschliche Fahrer, neben der Straßenverkehrsordnung informelle Regeln nutzen, um miteinander zu kommunizieren. Es gibt eine Anzahl von Situationen, in denen ein Fahrer auf das Verhalten eines anderen reagieren muss und mit diesem dann ggf. kooperiert. Ein wichtiges Beispiel für eine Situation mit erhöhter Interaktion ist der Spurwechsel im Niedriggeschwindigkeitsbereich, bei dem ein Einscherer vor einem anderen Fahrer auf die schnellere Fahrbahn einscheren möchte. Diese Interaktion entspricht einer Konfliktsituation, in der jeder Verkehrsteilnehmer bestimmte Interessen und Absichten verfolgt. Um einen reibungslosen Ablauf zu garantieren ist hier kooperatives Verhalten durch Kommunikation unabdingbar.

Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Vorbereitungsphase des Spurwechsels, da in dieser Phase die Entscheidung des Interaktionspartners gefällt wird, zu kooperieren oder nicht. Nach Risser (1987) ist kooperatives Verhalten in einer Fahrstreifenwechselsituation aus Einschererperspektive durch den Bremsvorgang und aus Folgefahrerperspektive durch aktive Kontaktaufnahme gekennzeichnet. Die Vorbereitungsphase des Spurwechsels ist somit durch verschiedene Parameter wie beispielsweise Blinkerstart, Verweilzeit, Querversatz oder Spurwechseldauer gekennzeichnet, die je nach Parametrierung eine unterschiedliche Außenwirkung erzielen können. Auf der anderen Seite ist der Bremsvorgang durch Parameter wie die Reaktionszeit, Verzögerung und Umfang der Geschwindigkeitsreduktion oder auch Lenkradeinschlagswinkel des Folgefahrers bzw. durch eine Time Headway zwischen Folge- und Vorderfahrzeug gekennzeichnet. Hinweise welche Parameter letztendlich im Methodenteil untersucht werden liefert, wie zuvor erwähnt, die Objektprädiktion. Da es zu dem in der Dissertation untersuchten Thema keine Literatur gibt, die die Kooperation, während eines Fahrstreifenwechsels aus psychologischer Perspektive untersucht, orientiert sich die

Vorgehensweise der Arbeit an einem verwandten Gebiet, der Untersuchung der Interaktion zwischen Fußgängern und Autofahrern, um letztendlich Handlungsempfehlungen geben zu können, wie ein automatisiertes Fahrzeug mit einem Menschen kommunizieren soll. Im folgenden Kapitel wird kurz der Stand der Technik aufgezeigt, um nachvollziehen zu können, an welchem Punkt die Ergebnisse der Arbeit einfließen könnten.

3 Stand der Technik

Der Stand der Technik dient dazu aufzuzeigen, an welchem Punkt die Ergebnisse dieser Arbeit einfließen sollen. Zunächst erfolgt ein Überblick über die Funktion von Fahrerassistenzsystemen, (**Kap. 3.1**) als auch über die bestehenden Systeme in einer Fahrstreifenwechselsituation bei verschiedenen Automobilherstellern. Diese beziehen sich sowohl auf die Reaktion des Folgefahrers auf einen Einscherer als auch auf den Einscherer selbst (**Kap. 3.2. - 3.3**). Um einen Einblick zu bekommen, wie diese Systeme funktionieren und ein Verständnis zu generieren wo die Ergebnisse dieser Arbeit einfließen sollen, werden im nächsten Kapitel die Logik der dahinterliegenden Modelle (Gap acceptance und Folgefahrermodelle) aus der Literatur beschrieben (**Kap. 3.4**). Dabei werden die Grenzen der bestehenden Modelle in **Kap. 3.4.3** herausgearbeitet.

3.1 Einordnung der Fahrerassistenzsysteme

Unter Fahrerassistenzsystemen (FAS; auf Englisch „*Advanced Driver Assistance Systems*“ (ADAS) wird folgendes verstanden: „Fahrerassistenzsysteme sind elektronische Systeme im Fahrzeug, die den Fahrer bei seiner Fahraufgabe unterstützen sollen. Diese enthalten häufig die Prämissen einer Steigerung des Fahrkomforts, der Sicherheit oder der Ökonomie des Fahrens“ (Winner, Hakuli, & Wolf, S.65, 2012).

Sie zeichnen sich nach Knapp, Neumann, Brockmann, Walz und Winkle (2009) durch folgende Merkmale aus:

- Unterstützung des Fahrers bei der primären Fahraufgabe
- Aktive Unterstützung bei der Quer- und/oder Längsregelung mit oder ohne Warnung
- Erkennung und Bewertung der Fahrzeugumgebung
- Einsatz komplexer Signalverarbeitung
- Direkte Interaktion zwischen Fahrer und System¹

(S.4).

¹ Eigene Übersetzung

In dieser Arbeit sind vor allem die Fahrerassistenzsysteme von Bedeutung, die die Quer- und Längsführung steuern, da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf die Einscherer- als auch Folgefahrerperspektive beim Fahrstreifenwechsel gelegt wird. Diese werden im Folgenden dargestellt.

3.2 Bestehende Spurwechselassistenten

Im Folgenden soll eine Übersicht über den aktuellen Stand der Fahrstreifenwechselassistenten gegeben werden. Dabei soll zunächst allgemein auf die Klassifikation von Fahrstreifenwechselassistenten eingegangen werden und im nächsten Schritt beispielhaft bestehende Modelle von Automobilherstellern dargestellt werden.

Im Bereich des Fahrstreifenwechsels werden zwei Arten von FAS unterschieden: Fahrstreifenwechselwarnungen und -assistenten. Die Fahrstreifenwechselwarnungen werden näher in der ISO Norm 17387 (ISO 17387, 2008) beschrieben. Fahrstreifenwechselwarnungen zeichnen sich dadurch aus, dass der Fahrer beim Fahrstreifenwechsel vor potentiellen Kollisionen gewarnt wird. Sie differenzieren zwischen drei Typen:

- Warnungen vor Fahrzeugen, die sich im toten Winkel auf der angrenzenden Spur befinden (Typ I).
- Warnung vor Fahrzeugen, die sich von hinten auf der Nebenspur annähern (Typ II).
- Warnung vor Fahrzeugen, die sich entweder im toten Winkel befinden oder sich von hinten auf der Nebenspur annähern (Typ III).

Zusätzlich findet sich in der Norm ein Systemzustandsdiagramm für Fahrstreifenwechselassistenten. Die Aktivierung des Systems erfolgt über ein Kriterium, das aus einer minimalen Aktivierungsgeschwindigkeit und der nutzerseitigen Aktivierung der Funktion besteht. Wenn das System aktiviert ist, erfolgt eine Warnung in Abhängigkeit der Erfüllung der Kriterien von Typdefinition I – III.

Die Warnung kann in mehreren Stufen ablaufen. Stufe 1 impliziert eine Warnung bei einer Verkehrssituation mit erhöhtem Gefahrenpotential z.B. in Form eines visuellen Warnsignals. Bei Erreichen anderer Kriterien wie beispielsweise der Betätigung des Blinkers, kann eine Intensivierung der Warnung erfolgen. Bei fehlender Reaktion kann die Warnung verstärkt werden bis hin zu einem aktiven Eingriff des Systems in die Fahrzeugquerführung wie beispielsweise in der aktuellen 5er und 7er Reihe der Marke BMW (Winner, Hakuli, Lotz, & Singer, 2012)

Warnungen können auf der visuellen, akustischen und haptischen Ebene erfolgen, was anhand der folgenden Beispiele verschiedener Automobilhersteller exemplarisch dargestellt werden soll.

In der BMW 7er Reihe sind folgende Spurwechselwarnsysteme integriert:

Die **Spurwechselwarnung** unterstützt bei der Einschätzung der aktuellen Situation, wenn sich ein Fahrzeug von hinten oder im toten Winkel mit hoher Geschwindigkeit nähert. Sollte die Nebenspur besetzt sein, erfolgt eine visuelle Warnung im Außenspiegel. Wenn dennoch der Fahrtrichtungsanzeiger bedient wird, erfolgt ein Aufblinken des Symbols als auch eine Lenkradvibration. Die **Spurverlassenswarnung** zeichnet sich dadurch aus, dass ab einer Geschwindigkeit von 70 km/h beim Verlassen der Spur, auch ohne Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers eine Warnung in Form einer Lenkvibration erfolgt. Der **Spurhalteassistent** schützt mit aktivem Lenkeingriff vor Kollisionen durch Fahrzeuge von der Nebenspur bei Querbewegung in Richtung der Zielspur (BMW AG, 2018).

Mercedes-Benz bietet einen „**Aktiven Totwinkel- Assistenten**“ an, der den Fahrer über ein akustisches Signal warnt. Zusätzlich hat die neue E-Klasse einen **aktiven Spurwechselassistenten**, der selbständig den Fahrstreifenwechsel im Geschwindigkeitsbereich 80 km/h bis 180 km/h ausführt, wenn gewisse Sicherheitskriterien, wie eine freie Nachbarspur von 3 s gegeben ist. Um diesen zu aktivieren muss der Fahrer den Blinker länger als 2 s betätigt haben (Daimler AG, 2015).

Audi unterstützt den Fahrer mit dem Spurwechselwarnsystem „**Audi Side Assist**“ schon ab einer Geschwindigkeit von 15 km/h, mithilfe eines visuellen Signals im Außenspiegel, welches, wenn der Fahrer nicht darauf reagieren sollte, mehrmals aufblinkt. Dieses wird aktiviert, sobald sich ein Fahrzeug von hinten nähert, das von den Heck- Radarsensoren registriert wurde (AUDI AG, 2019).

In diesem Kapitel wurden Fahrerassistenzsysteme, die bei der Querführung unterstützen beschrieben. Im nächsten Kapitel werden diese um Systeme, welche die Längsführung unterstützen, erweitert.

3.3 Bestehende Abstandsregeltempomaten

In diesem Kapitel wird sowohl ein Überblick über die Funktionalität der aktuellen Abstandsregelsysteme gegeben als auch auf ausgewählte Beispiele der Systeme von Automobilherstellern eingegangen. Ein Abstandsregeltempomat ist ein Komfortsystem, das die Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Situation reguliert. Es unterstützt den Fahrer somit in der Fahrzeuglängsführung. Je nach Hersteller finden sich andere Bezeichnungen für

dieses System, wie beispielsweise *Automatic/Adaptive Cruise Control* oder *Autonomous Intelligent Cruise Control* (ACC). Die dahinterliegenden Normen sind ISO 15622 (ISO 15622, 2002) und ISO 22179 (ISO 22179, 2009). Die Erstere definiert die Standardfunktionalität, während die Letztere eine Erweiterung darstellt und für den Niedriggeschwindigkeitsbereich ausgelegt ist (Winner et al., 2012). Der **Mercedes Benz Distronic Plus** reguliert die Geschwindigkeit zum Vorderfahrzeug durch aktives Verzögern und Beschleunigen in der eigenen Fahrspur. Dabei wird der Sicherheitsabstand entsprechend den Wünschen des Fahrers eingehalten. In kritischen Situationen wird der Fahrer auditiv durch einen Warnton bzw. haptisch aufgefordert, die Fahrzeugführung zu übernehmen. Der Mercedes-Benz Distronic Plus ist mit Radarsensorik ausgestattet. Er agiert in einem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 200 km/h (MERCEDES-BENZ, 2015).

Bei BMW findet sich der **ACC Stop & Go**. Das System funktioniert in einer Geschwindigkeitsspanne von 0 bis 210 km/h. Auch in Situationen mit dichtem Verkehr folgt das Fahrzeug automatisch dem Verkehr und reagiert bei kritischen Situationen ähnlich wie bei den Spurwechselassistenten mit einer mehrstufigen Warnung. Das Anfahren erfolgt automatisch wieder nach 3 s, was über die Sicherheitsfunktion iBrake gesteuert wird (Radecke, 2013).

Audi bietet ein ähnliches System, den **Adaptive Cruise Control mit Stop & Go-Funktion** an. Dieser reguliert die Geschwindigkeit in einem Bereich zwischen 0 km/h und 250 km/h (Audi AG, 2018).

Zusammenfassend ist bei allen derzeitigen Systemen zu sagen, dass im Falle eines einscherenden Fahrers erst dann reagiert wird, wenn der Einscherer in dem Erfassungsbereich des eigenen Fahrzeuges registriert wird. In diesem Zusammenhang wird auch von Fahrschlauch gesprochen. Nachteilig ist dabei, dass aufgrund der zeitlichen und örtlichen Nachwirkung (die sog. „*Hysteresis*“) bei der Zuordnung des Fahrschlauches verzögert auf einen Einscherer reagiert wird, was von Kunden als negativ empfunden wird (Winner et al., 2012).

Fahrerassistenzsysteme, sowohl aus Folgefahrer- als auch Einschererperspektive, sind bis jetzt auf reaktive Unterstützung des Fahrers ausgelegt und weisen noch keinen aktiven Part des Kooperierens mit anderen Fahrzeugen auf. Zudem wird die Außenwirkung des Fahrverhaltens vernachlässigt. Im Zuge der Automatisierung ist dies jedoch wichtig, da sich der Insasse zukünftig mit Nebentätigkeiten beschäftigen wird und der Automobilhersteller die Verantwortung trägt, dass der Insasse nicht einer potentiellen Gefährdung ausgesetzt wird, indem unbeabsichtigt ein negatives Außenbild kommuniziert wird. Zum anderen ist er dafür verantwortlich, dass der Verkehrsfluss durch sein Verhalten nicht beeinträchtigt wird, was mit

der Notwendigkeit einhergeht, einen aktiven Part im Verkehrsgeschehen zu übernehmen und, falls notwendig, in bestimmten Situationen, die durch erhöhte Interaktion gekennzeichnet sind, seine Intention durch Kommunikation noch zu verdeutlichen. Um ein besseres Verständnis zu bekommen, nach welcher Logik Fahrerassistenzsysteme aufgebaut sind, soll ein kurzer Abriss über die dahinterliegenden Gap Acceptance und Folgemodelle gegeben werden.

3.4 Gap Acceptance und Fahrzeugfolgemodelle

Die Fahrzeugführung lässt sich in Modelle für die Quer- und Längsführung unterteilen. Diese liefern die Basis für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und werden in Verkehrssimulationen zum Testen von Anwendungsszenarien genutzt. Sie beschreiben, wie zum einen in einem Einscherszenario im Niedriggeschwindigkeitsbereich vorgegangen (Gap acceptance) und zum anderen wie in einem Folgeszenario auf Einscherer reagiert wird. Um ein besseres Verständnis zu bekommen, an welchem Punkt diese Arbeit ansetzen soll bzw. wo die Limitationen dieser Modelle liegen, wird im Folgenden auf die Modelle eingegangen.

3.4.1 Gap Acceptance Modelle

Spurwechselmodelle lassen sich in freiwillige (auf Englisch „discretionary“) und obligatorische (auf Englisch „mandatory“) Spurwechselmodelle unterteilen. Diese unterscheiden sich darin, dass erzwungene Spurwechsel (MLC) stattfinden, wenn sie notwendig sind, wie bei einem Spurwegfall oder einer Baustelle (Gurupackiam & Jones, 2011). Von freiwilligen Spurwechseln (DLC) wird gesprochen, wenn es die aktuelle Situation verbessert (Goswami, 2007). In dieser Arbeit soll der Fokus auf freiwillige Spurwechsel gelegt werden. Gap Acceptance Modelle sind eine Unterkategorie von Spurwechselmodellen und lassen sich dem Anwendungsszenario Einscherverhalten im dichten Verkehr im Niedriggeschwindigkeitsbereich zuordnen. Unter *Gap* versteht man den zeitlichen und räumlichen Abstand zwischen Hinter- und Vordermann auf der Zielspur. Der Abstand wird in Sekunden gemessen (Gurupackiam & Jones, 2011). Bei Gap Acceptance geht es um die kleinste Lücke, die erforderlich ist, damit der einscherende Fahrer noch einen sicheren Fahrstreifenwechsel durchführen kann. Somit beschreiben Gap Acceptance Modelle das Entscheidungsverhalten für oder gegen eine Lücke (Hwang & Park, 2005).

Gap Acceptance Modelle unterscheiden je nach Autor drei Fälle: Normaler, erzwungener und kooperativer Spurwechsel. Unter einem erzwungenen Spurwechsel versteht man, dass der Einscherer sich in die Lücke drängt, das heißt, den Folgefahrer dazu nötigt, zu verzögern bis die Lücke groß genug ist, einen Spurwechsel zu vollziehen. Bei kooperativen Modellen wird

von einem Höflichkeitsfaktor ausgegangen, im dem Sinne, dass der Folgefahrer von selbst verzögert, um den Fahrer einscheren zu lassen (Akçelik, 2007).

Im Folgenden sollen die gängigsten Gap Acceptance Modelle vorgestellt werden. Einen Gesamtüberblick liefert Akçelik (2007). Diese lassen sich in vier Bereiche klassifizieren, wie in Abbildung 16 dargestellt.

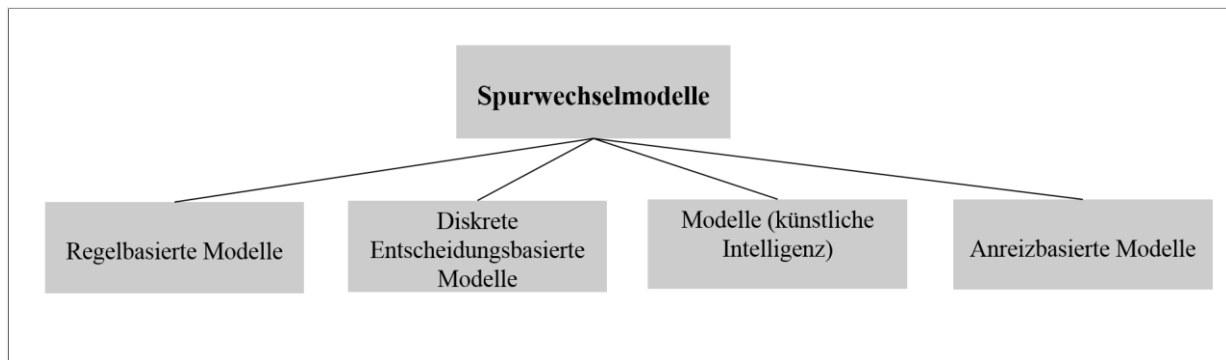


Abbildung 16. Klassifikation von Spurwechselmodellen nach Rahman et. al (2013)

Regelbasierte Modelle

Grundlage vieler Modelle ist das deterministische und regelbasierte Spurwechselmodell nach Gipps (1986). Dieses wurde sowohl für Situationen wie Autobahnauf- und -abfahrten, als auch Spurwechsel während der Fahrt entwickelt. Gipps (1986) macht die Entscheidung und Ausführung eines Spurwechsels von drei Faktoren abhängig: Die Durchführbarkeit, Notwendigkeit und der Wunsch einen Spurwechsel durchzuführen. Nach Gipps (1986) beeinflusst die Wunschgeschwindigkeit bzw. die richtige Spur für ein Spurwechselmanöver das Fahrerverhalten. Die Distanz vor dem Spurwechselmanöver vor einer Autobahnauf- bzw. -abfahrt definiert die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Zone. Wenn diese weit weg ist, hat sie keinen Einfluss auf das Spurwechselverhalten und der Fahrer konzentriert sich darauf, die gewünschte Geschwindigkeit beizubehalten. In der Mittelzone werden Spurwechsel nur für die Abbiegespuren bzw. die daran angrenzenden Fahrspuren berücksichtigt. Kurz vor der Kurve konzentriert sich der Fahrer auf die richtige Spur und ignoriert andere Überlegungen. Die Zonen werden deterministisch definiert, wobei auf die Individualität des Fahrers nicht eingegangen wird. Submikroskopische Simulationsmodelle, die auf Gipps' Modell beruhen und zu den regelbasierten Modellen gehören sind CORSIM (Halati, Lieu, & Walker, 1997), ARTEMIS (Hidas, 2005) und PELOPS (Bröckerhoff, 2010).

Diskrete Entscheidungs-basierte Modelle

Ahmed (1999) entwickelte ein dynamisches, diskretes Entscheidungsmodell. Er unterschied dabei drei Prozessstufen: Ob man einen Spurwechsel durchführen will, Wahl der Zielspur und

Lückenwahl. Zusätzlich unterschied er noch zwischen drei Arten von Spurwechselmanövern: MLC, DLC und FC (auf Englisch „*forced merging*“). Das letztere entspricht einem Szenario im dichten Verkehr, wenn der Fahrer sich eine nicht vorhandene Lücke schafft. Ein Modell, das auch zu den diskreten Entscheidungsmodellen zählt, ist das von Toledo und Zohar (2007). Sie entwickelten ein probabilistisches Modell, das den Trade - Off zwischen MLC und DLC abbildet. Das Modell besteht aus zwei Schritten: Der Entscheidung für die Zielspur und der Frage der Lückenakzeptanz. Dabei werden folgende Variablen mit einbezogen: Variablen über die benachbarte Spur (z.B. Lücken und Geschwindigkeiten), Ortsvariablen (z.B. Entfernung von der geplanten Ausfahrt), Fahrerfahrung (z.B. Vermeidung der nächstgelegenen Fahrspur neben der Schulter) sowie Fahrstil und -fähigkeiten.

Modelle basierend auf künstlicher Intelligenz bzw. Anreizbasierte Modelle

Weitere Modelle fallen in den Bereich der künstlichen Intelligenz wie beispielsweise Fuzzy - Logic - basierte Modelle oder künstliche neuronale Netze (Hunt & Lyons, 1994; Moridpour, Rose, & Sarvi, 2010) oder in den Bereich anreizbasierte Modelle wie MOBIL (Kesting, Treiber, & Helbing, 2007). Diese Modelle lernen größtenteils anhand von unbekannten Eingangsgrößen und anhand von großen Datenmengen. Somit ist nicht immer nachvollziehbar, nach welchen Regeln bzw. Parametern Entscheidungen gefällt werden. Da es aber das Ziel der Arbeit ist, gerade diese Modelle um derartige Erkenntnisse zu ergänzen, soll nicht näher darauf eingegangen werden.

3.4.2 Folgemodelle

Da es eines der Ziele dieser Arbeit ist, kooperatives Verhalten auch aus Folgefahrerperspektive zu objektivieren, wird in diesem Kapitel auf die entsprechenden Folgemodelle eingegangen, die das Verhalten des Folgefahrers beschreiben.

Diese klassifizieren sich in Abhängigkeit der benutzten Logik in drei Unterkategorien klassifiziert (siehe Abbildung 17). Im Folgenden werden diese übersichtsartig dargestellt.

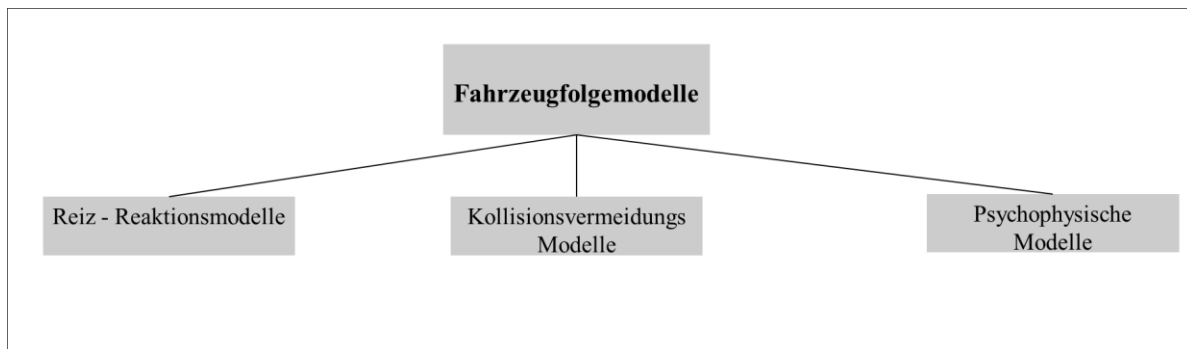


Abbildung 17. Klassifikation von Folgemodellen nach Munigety und Mathew (2016).

Reiz - Reaktionsmodelle

Reiz - Reaktionsmodelle beschreiben die Reaktion des Folgefahrers auf verschiedene Umgebungsreize, wie z.B. Abstands- und Geschwindigkeitsänderungen relativ zum Vorderfahrzeug unter Berücksichtigung einer festen Reaktionszeit. Diese Modelle beziehen sich vor allem auf Situationen im dichten Verkehr, bei denen es wenig Möglichkeiten zum Überholen gibt und die Fahrer gezwungen sind, dem vorausfahrenden Fahrzeug zu folgen. Das bekannteste Modell stammt von Chandler et al. (1958) und Gazis et al. (1961) und heißt Gazis-Herman-Rothery Modell. Dieses Modell basiert auf der Annahme, dass die Beschleunigung des Folgefahrers proportional zur Geschwindigkeit des Folgefahrers, dem Geschwindigkeitsunterschied zwischen Folgefahrer und Vorderfahrzeug und der THW, ist. Das Modell kann symmetrisch oder unsymmetrisch sein. Ein symmetrisches Modell besagt, dass dieselben Parameter für Beschleunigung und Verzögerung genutzt werden, während ein unsymmetrisches Modell von verschiedenen Parametern ausgeht.

Kollisionsvermeidungsmodelle

Kollisionsvermeidungsmodelle zielen darauf ab, dass der Fahrer immer einen Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug ein- und beibehalten will und entsprechend seine Geschwindigkeit anpasst, um potentielle Kollisionen zu vermeiden (Hoogendoorn & Bovy, 2001). Das erste Modell dieser Art wurde von Kometani und Sasaki entwickelt (1959). Gipps (1986) entwickelte eine Erweiterung dieses Modells. Dieses wurde in einigen Verkehrssimulationen wie MULTSIM (Gipps, 1986), SUMO (Krauss, 1998) und AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks; Barceló & Codina, 2005) integriert.

Psychophysische Modelle

Michaels (1963) entwickelte einen neuen Ansatz, bekannt als psychophysische Modell. Diese versuchen die menschliche Wahrnehmung abzubilden und Schwellen zu definieren, anhand derer Entscheidungen getroffen werden. Die Grundannahme ist, dass der Fahrer seine Beschleunigung durch die Wahrnehmung, wie sich der Blinkwinkel der Relativgeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug verändert, anpasst und seinen Sicherheitsabstand durch das Setzen eines Schwellenwertes einhält. Der Fahrer reagiert nur dann auf Veränderungen, was die THW oder die Relativgeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug angeht, wenn dieser Schwellenwert erreicht wird (Leutzbach, 1988). Beispiele für psychophysische Modelle liefern Fritzsche (1994) und Wiedemann (1974). Das psychophysische Modell findet seinen Eingang in den Verkehrssimulationen PARAMICS (Parallel Microscopic Simulation; Druitt, 1998) das auf dem Modell von Fritzsche (1994) basiert, VISSIM (Verkehr In Städten Simulation; Fellendorf & Vortisch, 2001) und PELOPS (Christens & Huang, 2008), das in Zusammenarbeit mit der BMW AG entwickelt wurde und ebenfalls auf dem Modell von Wiedemann (1974) aufbaut.

Aufgrund der Vielzahl der Fahrzeugfolgemodelle wurde hier nur eine bestimmte Auswahl dargestellt. Einen Gesamtüberblick liefern Hoogendoorn und Bovy (2001).

3.4.3 Grenzen der Modelle

Die derzeitigen Längs- und Querführungsmodelle werden der Komplexität des menschlichen Interaktionsverhaltens nicht gerecht. Es werden nur die objektiven Fahrparameter betrachtet und darauf basierend Modelle entwickelt. Diese haben bezogen auf die Querführung zum Inhalt, welcher Fahrstreifen gewählt wird, ob man einen Fahrstreifenwechsel durchführen kann bzw. ob bestimmte Lückengrößen noch akzeptiert werden und somit für den Fahrer durchführbar sind. Bei der Betrachtung der Längsführungsmodelle wird wenig auf die Reaktion des einscherenden Fahrers eingegangen.

Dabei werden die Modelle als Entscheidung betrachtet, die unidirektional ist und eine sofortige Aktion beschreibt (Keyvan-Ekbatani, Knoop, & Daamen, 2016). Zwei Aspekte werden dabei nicht beachtet: Zum einen sind sowohl der Fahrstreifenwechsel als auch die Reaktion auf Einscherer Vorgänge, die eine aktive Interaktion beschreiben. Zum anderen wird die menschliche Wahrnehmung außer Acht gelassen, die wiederum ein bestimmtes Verhalten bewirken kann. In dieser Arbeit soll ein Modell entwickelt werden, welches sich von den bisherigen Modellen dahingehend unterscheidet, dass es als aktives Modell fungiert, das durch

verschiedene Strategien versucht, die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, dass eine Lücke dynamisch geöffnet wird und den Faktor der subjektiven Wahrnehmung und Bewertung der Situation miteinschließt. Dies bedeutet konkret, dass nicht nur anhand von Verzögerungswerten darauf geschlossen wird, dass der Fahrer einscheren kann, sondern auch um die subjektive Bewertung verifiziert und ergänzt wird.

4 Zusammenfassung der Literatur

Die Vorteile zunehmender Automatisierung für den Komfort des Insassen, der Verkehrseffizienz und Verringerung der Emissionen sind in der Übergangsphase nur dann möglich, wenn sich das Fahrzeug dem Kommunikationsverhalten des Menschen anpasst und die Außenwirkung mitberücksichtigt wird. Der Verkehr ist durch Situationen gekennzeichnet, bei denen ein kooperatives Verhalten unerlässlich ist, um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten. Der Fokus wurde auf kooperatives Verhalten gelegt, da kooperatives Verhalten viele Vorteile mit sich bringt, was sich u.a. in der Reziprozität widerspiegelt (Cialdini & Trost, 1998).

Diese Arbeit beleuchtet als Anwendungsszenario eine Fahrstreifenwechselsituation im Niedriggeschwindigkeitsbereich aus Einscherer- und Folgefaherperspektive. Dieser Anwendungsfall gehört zu den komplexesten Szenarien im Straßenverkehr (Ammoun, Nashashibi, & Laurgeau, 2007) und erfordert eine aktive Abstimmung und Kooperation zwischen den Verkehrsteilnehmern (Zimmermann et al., 2018). Bei der Definition von Kooperation wird je nach Situation die Gewichtung auf andere Merkmale gelegt. Ziel dieser Arbeit ist es, basierend auf Studien zu erfassen, was Kooperationsbereitschaft in einer Fahrstreifenwechselsituation ausmacht, um darauf basierend Handlungsempfehlung für die Auslegung eines kooperativen Fahrerassistenzsystems zu geben. Dementsprechend wurden Kriterien basierend auf einem Kriterienkatalog von Düring (2006) bestimmt und Kooperation wurde allgemein anhand von folgenden Merkmalen charakterisiert: Kooperation wird als positive, sich ergänzende Zusammenarbeit betrachtet, die sich der Mittel der Kommunikation bedient und zwischen zwei Interaktionspartnern stattfindet. Die Kommunikation im Straßenverkehr ist durch formelle und informelle Regeln gekennzeichnet. Vor allem mithilfe der informellen Kommunikation können Intentionen eindeutig vermittelt und eine bestimmte Außenwirkung erzeugt werden. Somit kommt der Kommunikation eine bedeutsame Rolle zu. Ziel der Kooperation durch Kommunikation ist die Gewährleistung der Sicherheit für beide Parteien. Auf Verhaltensebene soll die Definition von Risser (1987) übernommen werden, der einen kooperativen Spurwechsel aus der Einschererperspektive durch das Abbremsen des

Folgefahrsers und aus der Folgefahrsersperspektive durch die „aktive“ Kontaktaufnahme des Einscherers charakterisiert. Das Gegenbeispiel eines unkooperativen Verhaltens wäre in diesem Szenario das Weiterfahren oder beschleunigen des Folgefahrsers bzw. als Einscherer (zwar unter Benutzung des Blinkers), aber ohne auf die Reaktion des Folgefahrsers zu achten, einen Spurwechsel zu initiieren. Der Grund für die Wahl der Definition liegt in der Kritik bestehender regelbasierter Gap Acceptance und Fahrzeugfolgemodelle, die zwar die StVO beachten, aber den Fokus auf passives Fahrverhalten bzw. auf reaktives Verhalten legen und die Außenwirkung nicht mitberücksichtigen. Dies hat zur Folge, dass die Intention des automatisierten Fahrzeuges vom umliegenden Verkehr nicht verstanden bzw. das Fahrzeug negativ von den umliegenden Fahrzeugen wahrgenommen wird, was eine negative Reaktion anderer Verkehrsteilnehmer provozieren kann.

Damit kooperatives Handeln stattfinden kann, müssen gewisse Grundvoraussetzungen erfüllt sein, die es zu beachten gilt. Zum einen muss die Situation subjektiv sowie objektiv als sicher wahrgenommen werden. Zum anderen muss in der Situation erkennbar sein, dass kooperatives Handeln möglich ist. Dabei darf der Fahrer nicht durch andere Ereignisse abgelenkt werden und die Intention des anderen muss eindeutig erkennbar sein (Benmimoun et al., 2004). Menschen orientieren sich basierend auf dem SEEV Modell der Aufmerksamkeitsverteilung nach Wickens et al. (2003) an bestimmten Reizen bzw. Merkmalen die die Aufmerksamkeit auf sich ziehen. Diese können dann als Basis dienen Entscheidungen zu treffen. Auf der anderen Seite müssen diese Reize auch als eindeutig wahrgenommen werden. Hierzu wird die Signalentdeckungstheorie herangezogen (Green & Swets, 1966), die die Reizintensität beschreibt, d.h. als wie eindeutig ein bestimmter Parameter wahrgenommen wurde. Um entscheiden zu können welche Merkmale relevant sind, kann aus technischer Perspektive die Methode der Objektprädiktion zu Hilfe genommen werden, die die Parameter mit der größten Vorhersagekraft für eine Intention identifizieren kann. Auf die Fahrstreifenwechselsituation bezogen wäre dieser beim Bremsvorgang des Folgefahrsers beispielsweise Parameter wie Verzögerung, Umfang der Geschwindigkeitsreduktion und Reaktionszeit des Folgefahrsers und die Time Headway zwischen Folge- und Vorderfahrzeug.

Der Prozess der Spurwechselankündigung des Einscherers zeichnet sich durch Parameter wie Zeitpunkt des Blinkerstartes, Verweildauer auf der eigenen Spur oder Spurwechseldauer aus (siehe Kap. 2.5).

Im Stand der Technik wurden neben bestehenden Fahrerassistenzsystemen, die die Fahrstreifenwechselsituation beschreiben, auch die dahinterliegenden aktuellen Modelle, die

als Simulationsgrundlage fungieren, vorgestellt. Es wurde gezeigt, dass die aktuellen regelbasierten Modelle, ein Defizit aufweisen, was die subjektive Außenwahrnehmung der Situation angeht und die informelle Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern. Dies ist aber gerade im Zuge der Automatisierung und Verschiebung der Verantwortung in Richtung System ein wesentlicher Faktor, der in die Fahrstrategie aufgenommen werden muss.

II Forschungsfragen

5 Forschungsfragen und Vorgehen

Ziel dieser Arbeit ist es Kooperation beim Fahrstreifenwechsel zu objektivieren, um Handlungsempfehlungen für die Auslegung einer Fahrstrategie für kooperative Fahrerassistenzsysteme zu geben. Es gibt verschiedene Gründe wann und warum ein Fahrstreifen gewechselt wird, sei es aus Gründen wie Auf- und Abfahrt auf die Autobahn oder hinsichtlich der Antizipation, um einscherenden Fahrern Platz zu machen (Olsen, 2003). Anhand der Literatur wurde deutlich, dass ein Szenario, das besonders Kooperation erfordert, eine Fahrstreifenwechselsituation im Niedriggeschwindigkeitsbereich darstellt, bei der ein Fahrer auf die schnellere Spur wechseln möchte und dazu mit einem Folgefahrer kooperieren muss (siehe Abbildung 18). Dieses Anwendungsszenario wurde gewählt, da der Fahrstreifenwechsel im Niedriggeschwindigkeitsbereich ein hohes Maß an Abstimmung unter den Verkehrsteilnehmern im Straßenverkehr erfordert (Zimmermann et al., 2018), was nicht nur mit einer hohen motorischen sondern auch kognitiven Beanspruchung einhergeht (Brackstone, McDonald, & Wu, 1998), da der Verkehrsteilnehmer die Intentionen des umliegenden Verkehrs wahrnehmen und richtig interpretieren, aber auch entsprechend darauf reagieren muss.

Basierend auf der Situationsdarstellung nach Risser (1987) wurde kooperatives Verhalten für den Einscherer eher allgemein beschrieben im Sinne eines Blinkens und auf den anderen Fahrer eingehen (Perspektive 1). Mögliche Fahrparameter, die dieses Verhalten beschreiben, wären basierend auf der Literatur (Kap. 2.5) der Blinkerstart, die Verweilzeit, die Spurwechseldauer oder der Querversatz. Für den sich nähernden Folgefahrer (Perspektive 2) würde Kooperation bedeuten, dass er dem anderen Fahrer durch Abbremsen, signalisiert, dass er einscheren kann. Auf Parameterebene würden die Parameter Verzögerung, Geschwindigkeitsabbau und die Reaktionszeit den Bremsvorgang beschreiben. Wie in Kap. 2.1.1 (Merkmale kooperativen Verhaltens beim Fahrstreifenwechsel) als auch in Kap. 2.4.5 (Parameter im Fahrstreifenwechselszenario) beschrieben, kann je nach der Art der Kommunikation d.h. je nach Auslegung bestimmter Merkmale eine andere Außenwirkung erzielt werden. So wird ein „dichtes“ Auffahren auf den Vorderfahrer als auch ein „knappes“ Einscheren vor dem

Folgefahrer als aggressives Fahren ausgelegt (Tasca, 2000). Auch uneindeutiges Verhalten, wie beispielsweise Blinken beim Fahrstreifenwechsel, um die Fahrspur zu wechseln, ohne weitere Handlungsschritte zu initiieren, ärgert bzw. beunruhigt andere Fahrer (Simon & Bullinger, 2017).

Diese Studien geben Anhaltspunkte was kooperatives Verhalten beim Fahrstreifenwechsel bedeuten könnte, allerdings machen diese nur Aussagen auf qualitativer Ebene. Somit ist nicht bekannt, welche Parameter Kooperationsbereitschaft beim Fahrstreifenwechsel ausmachen und wie diese ausgelegt sein müssen, um als kooperativ wahrgenommen zu werden. Zum anderen stellt sich, wenn das Ziel eine Empfehlung für die Auslegung einer Fahrstrategie sein soll, die Frage, ob das, was bei menschlichen Fahren als kooperativ empfunden wird auch auf ein automatisiertes Fahrzeug übertragen werden kann.

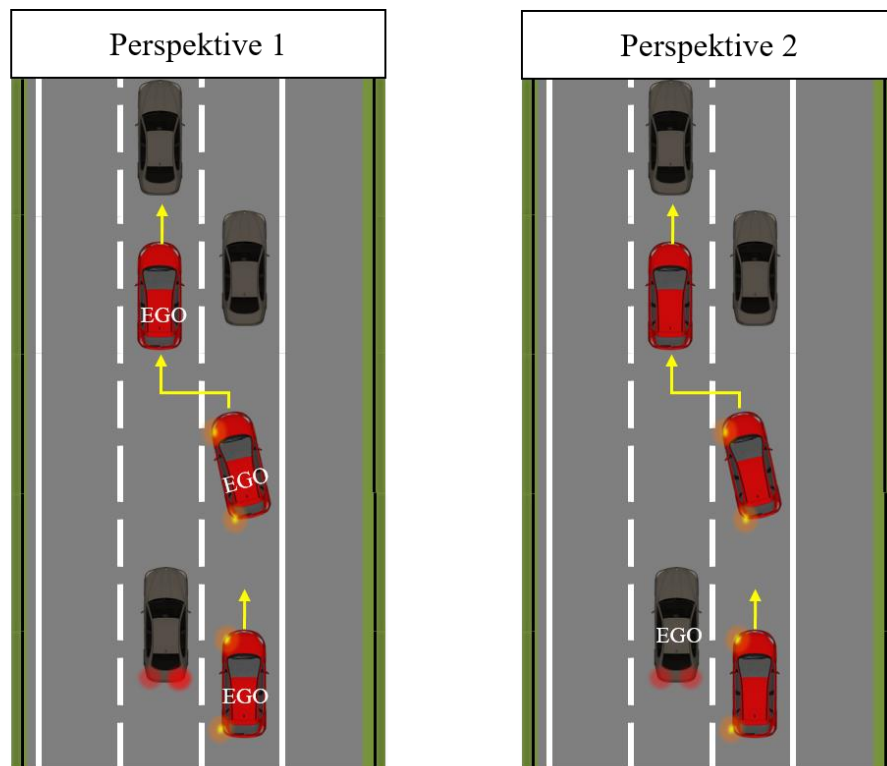


Abbildung 18. Darstellung des Fahrstreifenwechselszenarios aus der Einscherer- und Folgefahrerperspektive. Somit lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten, die sich in zwei Themenbereiche untergliedern:

Analyse menschlichen Kooperationsverhaltens

Erste Forschungsfrage: Was bedeutet kooperatives Interagieren im Fahrstreifenwechselszenario zwischen menschlichen Verkehrsteilnehmern?

Um diese Frage zu beantworten, muss das Fahrstreifenwechselszenario genauer betrachtet werden. Dabei wird in der **ersten Studie** (Kap. 6) aus der Einschererperspektive aufgezeigt,

was menschliche Fahrer als kooperatives Verhalten des Folgefahrers wahrnehmen und interpretieren, wenn sie den Fahrstreifenwechsel durchführen wollen.

In einer **zweiten Studie** (Kap. 7) wird die Perspektive gewechselt und diesmal wird aus Folgefahrerperspektive beurteilt, was als kooperatives Verhalten des Einscherers gedeutet wird. Da sich mehrere Strategien der Kooperation seitens des Einscherers gezeigt haben, wird diese Thematik in einer **dritten Folgestudie** (Kap. 8) wiederum untersucht. Darauf basierend werden nun Ableitungen für Fahrstrategien (Spurwechsel- und Folgestrategie) bezogen auf dieses Szenario gemacht.

Die nächste Forschungsfrage betrifft die Interaktion zwischen menschlichen Fahrern und automatisierten Fahrzeugen.

Analyse der Übertragbarkeit auf die Interaktion zwischen Fahrern und automatisierten Fahrzeugen

Zweite Forschungsfrage: Wie wird eine auf menschlichem Fahrverhalten basierende kooperative Fahrstrategie im Vergleich zu einer herkömmlichen Strategie bewertet und in Bezug auf die Interaktion mit einem automatisierten Fahrzeug beurteilt?

Um diese Frage zu beantworten werden die herkömmliche Fahrstrategien (Folgemodell (Wiedemann, 1974) und die Spurwechselstrategie TRM (Traffic Modelling), die bei BMW im Fahrermodell PELOPS (Christens & Huang, 2008) hinterlegt sind, betrachtet und die neu entwickelten Strategien mit diesen verglichen (Kap. 10). Dabei wird zum einen aus Folgefahrerperspektive eine neu entwickelte Fahrstrategie A mit der herkömmlichen Strategie aus PELOPS (TRM) und in einer weiteren Studie aus Einschererperspektive eine neu entwickelte Bremsstrategie A mit der herkömmlichen Strategie, basierend auf dem Folgemodell von Wiedemann (1974) verglichen. Zusätzlich wird erfasst, welche Erwartungshaltungen menschliche Fahrer gegenüber automatisierten Fahrzeugen haben und ob eine Übertragbarkeit auf ein automatisiertes Fahrzeug möglich ist. Darauf basierend sollen Ableitungen für die zukünftige Modellierung zwischen menschlichen Fahrern und automatisierten Fahrzeugen gemacht werden.

6 Untersuchung der Außenwirkung des Folgefahrers in einer Fahrstreifenwechselsituation

6.1 Einleitung

Wie in Kap. 3.4.2 dargestellt sind die aktuellen Folgemodelle nicht auf die Interaktion mit menschlichen Fahrern ausgelegt, da sie nicht aktiv mit den umgebenden Fahrern

kommunizieren, sondern nur passiv reagieren und sie zudem ihre Außenwirkung nicht mitberücksichtigen, was zu uneindeutigen und somit kritischen Situationen führen kann.

Anhand der Literatur bzgl. des kooperativen Verhaltens im Straßenverkehr (Ellinghaus, 1986, Maag, 2004; Tasca, 2000) ist bekannt, dass ein Fahrer, der einen Fahrstreifenwechsel durchführen möchte, es als kooperativ empfindet, wenn beispielsweise der Folgefahrer ihm durch Abbremsen oder durch Wechseln des Fahrstreifens Platz macht. In der Literatur wurde dies jedoch nur auf qualitativer Ebene betrachtet, zum anderen wurde keine Analyse vorgenommen anhand welcher Parameter sich menschliche Fahrer genau orientieren und ab welchen Schwellenwerten diese als kooperativ wahrgenommen werden.

Das SEEV Modell nach Wickens et al. (2003) postuliert, dass Menschen ihre Aufmerksamkeit nicht auf alle Reize in der Umgebung gleichzeitig richten, sondern sich in Abhängigkeit von Wissens- (der Erwartung und dem Wert) und reizgesteuerten Prozessen (dem Aufwand und der Salienz) an bestimmten Merkmalen orientieren, um Entscheidungen treffen zu können.

Anhand einer Vorstudie wurde ersichtlich, dass sich Fahrer bei einem Fahrstreifenwechsel auf bestimmte Parameter konzentrieren, um eine Entscheidung für oder gegen einen Fahrstreifenwechsel zu fällen.

Um herauszufinden, an welchen Fahrparametern sich Menschen bei einer Entscheidung zum Fahrstreifenwechsel orientieren, wurde eine Vorstudie mit $N = 35$ Probanden (16 weibliche Probanden) durchgeführt. Diese wurden über relevante Größen bei ihrer Entscheidung, ob sie einen Fahrstreifenwechsel durchführen können, befragt.

Es wurden zwei Fragen gestellt:

- a. Was ist bei Ihrer Entscheidung, ob ein Fahrstreifenwechsel möglich ist, relevant?
- b. Welche Indikatoren haben Sie genutzt, um sich zu entscheiden, ob ein Fahrstreifenwechsel möglich ist?

Die meisten Teilnehmer ($N = 25$) bezogen sich auf den Folgefahrer als wichtigsten Teilnehmer. Zusätzlich wurde noch das Vorderfahrzeug ($N = 10$) genannt. Der Folgefahrer bzw. sein Verhalten als wichtigster Indikator lässt sich durch Studien von Henning (2010), der in seiner Dissertation Verhaltensindikatoren für Fahrstreifenwechsel untersuchte, bestätigen. Dieser beobachtete u.a. bei einem Fahrstreifenwechsel nach links eine Zunahme der Blickrate im linken Außenspiegel. Auch Salvucci, Liu und Boer (2001) untersuchten das Blickverhalten während der Vorbereitungs- und Durchführungsphase eines Fahrstreifenwechsels. Sie fanden heraus, dass, sobald die Entscheidung für einen Fahrstreifenwechsel gemacht worden war, die Fahrer ihren Blick von Orientierungspunkten auf der Fahrspur unmittelbar vor ihnen, wie zum Beispiel dem Vordermann, hin zu Merkmalen auf der Nebenspur, wie Hinter und Vordermann,

zuwandten. Als Hinweis, ob ein Fahrstreifenwechsel möglich wäre, wurden vor allem Indikatoren der Längsbewegung genutzt, aber auch explizite Signale genannt (siehe Abbildung 19). Hinweise, basierend auf der Fahrbewegung des Folgefahrers wurden auch durch Henning (2010) als auch Salvucci et al. (2001) bestätigt.

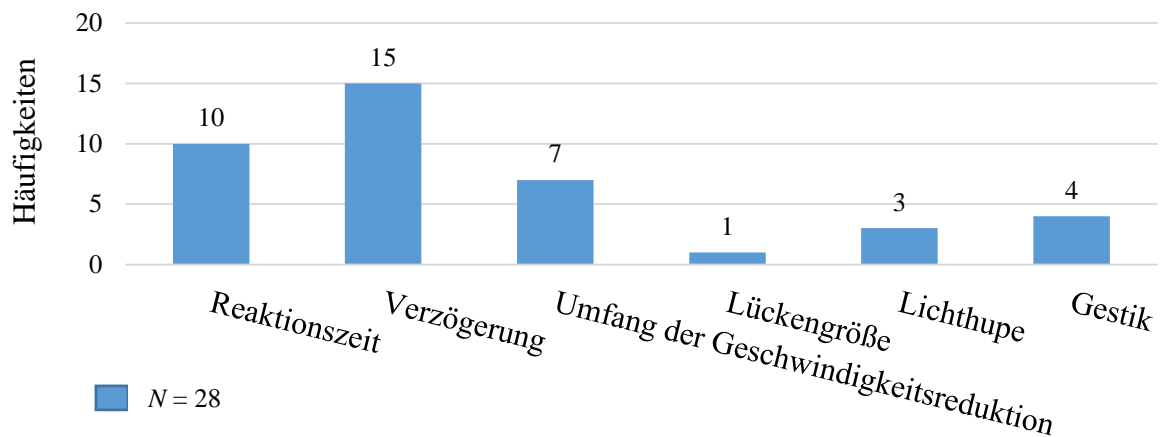


Abbildung 19. Indikatoren für die Durchführbarkeit des Fahrstreifenwechsels (Mehrfachnennung möglich).

Somit wurde in dieser Studie der Fokus auf die Reaktionszeit, die Verzögerung und den Umfang der Geschwindigkeitsreduktion gelegt. Um zu wissen, ab welchen Schwellenwerten ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt wird, erfolgte eine Untersuchung im statischen Fahrsimulator. Es wurde die Perspektive des Einscherers eingenommen. Um die Ergebnisse der subjektiven Bewertungen zu unterstützen, wurden zusätzlich noch die Fahrdaten ausgewertet und mit diesen in Zusammenhang gebracht.

Die Fahrdaten des Einscherers dienen gleichzeitig als Orientierung und Basis für die weiteren Studien, um das Einscherverhalten entsprechend zu parametrieren, das bedeutet Wertebereiche für die unabhängigen Variablen festlegen zu können. In **Kap. 6.2** werden die Forschungsfragen einleitend beschrieben und die Untersuchungsmethodik detailliert erklärt. In **Kap. 6.3** folgen die Ergebnisse mit anschließender Diskussion (**Kap. 6.4**). Die analysierten Parameter im Fahrstreifenwechselszenario (**Kap. 6.3.2**) dienen zudem als Basis, um die Schwellenwerte der unabhängigen Variablen der folgenden Studie (**Kap. 7**) zu definieren. Das folgende Kapitel beantwortete in der ersten Studie die Forschungsfrage:

Was bedeutet kooperatives Interagieren im Fahrstreifenwechselszenario zwischen menschlichen Verkehrsteilnehmern aus der Einscherer Perspektive?

6.2 Untersuchungsmethodik

6.2.1 Versuchsdesign

Der Fokus der ersten Studie war es in einem Fahrstreifenwechselszenario, die Außenwirkung des Folgefahrers zu untersuchen. Dabei ergaben sich folgende Forschungsfragen und Hypothesen:

Forschungsfragen

- 1. Bei welchen Schwellenwerten entscheiden Sie sich für einen Fahrstreifenwechsel?**
- 2. Wie nehmen Sie den Folgefahrer und die Situation wahr?**

Hypothesen

Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft

H1: Je stärker der Folgefahrer verzögert umso kooperativer wird er wahrgenommen

H2: Je mehr Geschwindigkeit der Folgefahrer abbaut umso kooperativer wird er wahrgenommen

H3: Je schneller der Folgefahrer reagiert umso kooperativer wird er wahrgenommen

Wahrgenommene Eindeutigkeit

H1: Je stärker der Folgefahrer verzögert umso eindeutiger wird er wahrgenommen

H2: Je mehr Geschwindigkeit der Folgefahrer abbaut umso eindeutiger wird er wahrgenommen

H3: Je schneller der Folgefahrer reagiert umso eindeutiger wird er wahrgenommen

Wahrgenommene Kritikalität

H1: Je schwächer der Folgefahrer verzögert umso kritischer wird er wahrgenommen

H2: Je weniger Geschwindigkeit der Folgefahrer abbaut umso kritischer wird er wahrgenommen

H3: Je langsamer der Folgefahrer reagiert umso kritischer wird er wahrgenommen

Als Nebenfragestellung wurde untersucht, ob die objektiven Fahrdaten die subjektiven Bewertungen der Probanden stützten.

6.2.2 Fahrscenario

Die Teststrecke stellte eine dreispurige Autobahn mit dichtem Verkehr dar. Kolonnen an Fahrzeugen fuhren auf der mittleren Spur mit einer THW von 2 s zwischen ihnen (siehe Abbildung 20). Der Abstand zwischen den Fahrzeugen wurde auf 2 s festgelegt, da es dem Folgeabstand zum Vorderfahrzeug laut StVO entspricht, die einen Abstand von einem halben Tacho vorsieht. Die Studie wurde in 27 Szenarien unterteilt, bestehend aus Kolonnen an Fahrzeugen, die mit unterschiedlichen Parameterkombinationen der UVs bei der Blinkersetzung des Fahrers reagierten.

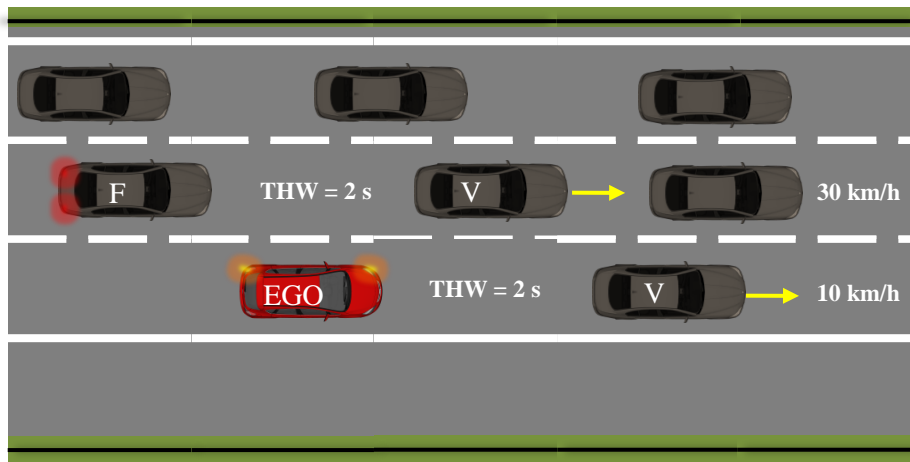


Abbildung 20. Darstellung des Fahrscenarios.

6.2.3 Darstellung der unabhängigen und abhängigen Variablen

Unabhängige Variablen (UV)

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung von Kooperationsbereitschaft mithilfe der Kommunikation über die Fahrbewegung. Anhand der Vorstudie wurde ersichtlich, dass sich Fahrer, die den Fahrstreifen wechseln, vor allem auf den Folgefahrer und dabei auf das Bremsverhalten des Folgefahrers beziehen. Somit wurde das Bremsverhalten bestehend aus Reaktionszeit, Verzögerung und Umfang der Geschwindigkeitsreduktion als UV gewählt. Von diesem Verhalten als Reaktion auf einen einscherenden Fahrer ist zudem bekannt, dass es als positiv von dem Einscherer wahrgenommen wird (Ellinghaus, 1986).

Die Versuchsplanung erfolgte nach dem MAX – KON – MIN Prinzip (Kerlinger & Pehazur, 1973). Basierend auf der Vorstudie als auch der Literatur (siehe Kap. 2.4.5) wurden diese jeweils dreifach gestuft. Um die Primärvarianz zu maximieren, wurde darauf geachtet Stufen zu wählen, die auch die Extreme abbilden.

Eine Übersicht über die UVs als auch der Definitionen liefert Tabelle 8. Diese orientiert sich an den Definitionen von Kap. 2.4.5. Die Reaktionszeit des Folgefahrers bezieht sich dabei auf

die Zeitspanne, beginnend von der Blinkersetzung des potentiellen Einscherers bis zum Zeitpunkt des Verzögerungsbeginnes. Dieser ist in der Literatur dadurch charakterisiert, dass Fahrer den Fuß vom Gas nehmen oder das Bremspedal betätigen. In der Literatur finden sich Werte zwischen 0.6 s bis 2.0 s (Ahmed, 1999; Green, 2000). In dieser Studie wurden 0 s als Reaktionszeit genutzt, um einen antizipierenden Fahrer darzustellen, der davon ausgeht, dass das Fahrzeug auf der rechten Spur einscheren möchte. Ein Wert von 2.0 s steht für einen Einscherer, der beispielsweise bedingt durch Ablenkung des Fahrers, einen Einscherer nicht erwartet würde. Die Verzögerung orientierte sich ebenfalls an den Wertebereichen der Literatur (Ahmed, 1999; Ehmanns, 2003).

Dabei richtet sich die Definition danach, wie Verzögerung in der Literatur gemessen wurde. Der Wertebereich für den Geschwindigkeitsabbau konnte nicht eindeutig in der Literatur erfasst werden und orientiert sich an einer Vorstudie im Fahrsimulator, um einen sinnvollen Wertebereich zu erhalten. Bei dieser Studie handelt es sich um ein 3x3x3 Studiendesign mit Messwiederholung. Die Teilnehmer waren dabei allen 27 Situationen ausgesetzt. Die Reihenfolge der Situationen wurde randomisiert, um Anker -, Carry - Over oder Ermüdungseffekte zu vermeiden (Bortz & Döring, 2006).

Tabelle 8. Darstellung der UVs.

Unabhängige Variablen	Ausprägung	Einheit	Beschreibung
Reaktionszeit	0, 1, 2	s	Zeitspanne von der Reizvorgabe (durch Blinkersetzung) bis Verzögerungsbeginn.
Verzögerung	0.5, 1.0, 1.5	m/s ²	Zeitpunkt, nach der Blinkersetzung, wenn vom Gas gegangen oder das Bremspedal betätigt wird.
Umfang der Geschwindigkeitsreduktion	2, 4, 8	m/s	Der Geschwindigkeitsabbau als Reaktion auf das blinkende Fahrzeug, basierend auf der Zeitspanne während des Bremsvorganges.

Abhängige Variablen (AV)

Ziel dieser Studie war es, die Außenwahrnehmung des Bremsverhaltens des Folgefahrzeuges zu erfassen. Wie im theoretischen Teil (Kap. 2) erläutert, spielt bei der Interaktion zwischen zwei Verkehrsteilnehmern zum einen eine wichtige Rolle, die Intention des anderen Fahrers wahrzunehmen und richtig zu interpretieren, zum anderen zu erkennen, wann dieser Kooperationsbereitschaft signalisiert. Da die gewonnenen Erkenntnisse für die Auslegung eines kooperativen, automatisierten Abstandregelautomaten genutzt werden sollten, wurde zusätzlich noch die Kritikalität der Situation erfasst. Für die Erfassung der Konstrukte wurden Single-

Item Fragen verwendet, da es nicht darum ging, allgemein die Konstrukte zu erfassen, sondern direkt auf eine Situation bezogen. Hierzu wurde den Probanden entsprechend nach Risser (1987) folgende Definitionen in Tabelle 9 gegeben

Tabelle 9. Definition der abhängigen Variablen.

Subjektive Variablen AV	Definition
Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft	Der Folgefahrer ist kooperativ „Der andere Verkehrsteilnehmer lässt mich vor sich in der Nebenspur hinein“ (Risser, 1987, S.70) Der Folgefahrer ist nicht kooperativ „Der andere Verkehrsteilnehmer verweigert die Kontaktaufnahme“ (Risser, 1987, S.70)
Wahrgenommene Kritikalität	Kritikalität der Situation mit klar vorgegebenen Toleranzgrenzen (Neukum et al., 2008)
Wahrgenommene Eindeutigkeit	Die klare Erkennung der Intention des Folgefahrers

Im Folgenden wird dargestellt wie die einzelnen Variablen erfasst wurden:

Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft und Eindeutigkeit

Um die wahrgenommene Kooperationsbereitschaft einzuschätzen, wurde das Kategorieunterteilungsverfahren (KU - Skala) nach Heller (1985) angewandt (siehe Tabelle 10, Abbildung 21). Der Teilnehmer gibt hierzu im ersten Schritt eine Verbalkategorie an und verfeinert seine Aussage durch die Angabe einer numerischen Kategorie im zweiten Schritt.

Situationskritikalität

Da die Studie ausgelegt ist, eine Basis für die Weiterentwicklung von einem FAS zu bilden, ist eine zusätzliche Erfassung der Situationskritikalität unerlässlich. Hierzu findet die „Skala zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen“ von Neukum et al. (2008; Abbildung 22) Verwendung. Ursprünglich wurde die Skala verwendet, um Querdynamikstörungen zu bewerten (Neukum & Krüger, 2003).

Der Vorteil der Kategorienskalen besteht darin, dass subjektiven Toleranzgrenzen durch die Bezeichnung von Kategorien (zum Beispiel „nichts bemerkt“, „harmlos“, „unangenehm“, „gefährlich“ und „nicht kontrollierbar“) eindeutig definiert werden.

Tabelle 10. Übersicht über die abhängigen Variablen.

Subjektive Variablen AV	Frage	Skala
Wahrgenommene Kritikalität	<i>Wie kritisch erschien die Situation?</i>	0 - 10, Kritikalitätsskala (Neukum et al., 2008)
Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft	<i>Wie kooperativ erschien der Fahrer auf der mittleren Spur?</i>	1 bis 15, Zusatzkategorie 0 (KU-Skala, Heller, 1985)
Wahrgenommene Eindeutigkeit	<i>Wie eindeutig hat der Fahrer auf mittleren Spur seine Intention angezeigt?</i>	1 bis 15, Zusatzkategorie 0 (KU-Skala, Heller, 1985)

Wie kooperativ erschien der Fahrer auf der mittleren Spur?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Viel			Sehr viel		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Wie eindeutig hat der Fahrer auf der mittleren Spur seine Intention angezeigt?

Gar nicht	Sehr wenig			Wenig			Mittel			Stark			Sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Abbildung 21. Fragen und Antwortformat zur Beurteilung der wahrgenommenen Kooperationsbereitschaft/Eindeutigkeit.

Wie kritisch erschien die Situation?

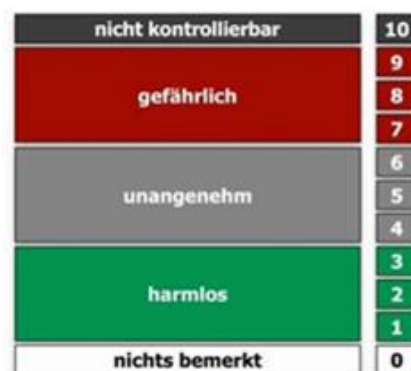


Abbildung 22. Single - Item Skala: Wahrgenommene Kritikalität der Situation (Neukum & Krüger, 2003).

6.2.4 Fahrsimulator

Die Studie wurde in einem statischen Fahrsimulator (siehe Abbildung 23) am WIVW (Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH) durchgeführt. Der Simulator verfügt über ein Automatikgetriebe und der Fahrer sitzt auf einem Fahrersitz mit Lenkrad, das mit Force-Feedback, Gaspedal und Bremspedal ausgestattet ist. Die virtuelle Szenerie wird auf fünf Bildschirme mit einer Auflösung von jeweils 1400 x 1050 Pixeln projiziert (vorne, links, rechts, links hinten, rechts hinten), um das 300° - Sichtfeld des Fahrers zu simulieren. Zusätzlich stellen zwei LCD-Displays die Außenspiegel dar. Ein Flachbildschirm im Heck des Fahrzeugs zeigt die Szenerie hinter dem Fahrzeug, wenn der Fahrer den Innenspiegel benutzt. Zwei LCD-

Displays mit einer Auflösung von 1024×768 Pixel werden als Navigationssystem und Tachometer verwendet. Die akustische Ausgabe erfolgt über ein 5.1 Dolby Surround System. Die Aktualisierungsfrequenz beträgt 120 Hz. Das Szenario wurde mit der Fahrsimulationssoftware SILAB (Krueger, Grein, Kaussner, & Mark, 2005) erstellt. Während der Versuchsdurchführung beobachtet der Versuchsleiter in einem Nebenraum alle Fahreransichten auf separaten Bildschirmen und kommuniziert mit den Teilnehmern über eine Gegensprechanlage.



Abbildung 23. Statischer Fahrsimulator des WIVW.

6.2.5 Durchführung

Die Studie dauerte ca. 1.5 Stunden und war in vier Teile gegliedert:

- 1. Einweisung** (Dauer bis ca. 10 min): Einweisung und Vorführung des Fahrzeugs. Das Fahrzeug war mit einem ACC ausgestattet, der sicherstellte, dass ein bestimmtes THW von 2 s zum Vorderfahrzeug eingehalten wurde, um die Bedingungen für jeden Teilnehmer zu gewährleisten.
- 2. Eingewöhnungsfahrt** (Dauer ca. 10 min): Kurze Fahrt, um die Fahrer mit der Fahrsimulation, der Bedienung des ACC sowie der Spurwechselaufgabe vertraut zu machen und sich nach jeder Situation an die gestellten Fragen zu gewöhnen.
- 3. Testfahrt** (Dauer ca. 60 min): Der Fahrer wurde gebeten, dem Vorderfahrzeug zu folgen, bis ein akustisches Zeichen gegeben wurde, um dann zu entscheiden, ob ein Spurwechsel für ihn möglich wäre. Alle zwei Minuten erschien auf der mittleren Fahrspur eine Fahrzeugkolonne mit geänderten Parametern. Nach jeder Entscheidung über einen Spurwechsel wurden die Teilnehmer gebeten, eine subjektive Bewertung ihrer wahrgenommenen Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität und abzugeben.
- 4. Abschlussgespräch** und Nachbesprechung (Dauer ca. 5 min)

Die Teilnehmer wurden gebeten, einem Vorderfahrzeug auf der rechten Spur zu folgen. Der gleichbleibende Abstand wurde durch ein ACC garantiert. Während der Fahrt fuhren schnellere Fahrzeugkolonnen auf der mittleren Spur und die Teilnehmer wurden angewiesen den Blinker

zu setzen. Basierend auf der Reaktion des Folgefahrers mussten Sie sich im nächsten Schritt für oder gegen einen Fahrstreifenwechsel entscheiden. Die Teilnehmer wurden verbal darauf hingewiesen, diesen zeitnah durchzuführen. Die Teilnehmer erhielten die Instruktion, die Aufgabe des Spurwechsels nur dann auszuführen, wenn sie die Verkehrssituation als sicher genug einschätzten.

6.2.6 Stichprobe

Insgesamt nahmen $N = 28$ Teilnehmer (12 Frauen) im Alter von 21 bis 69 Jahren ($M = 31.5$ Jahre, $SD = 11.5$ Jahre) an dieser Studie teil. Die Teilnehmer hatten zwischen 5 und 44 Jahre Fahrerfahrung ($M = 14.2$ Jahre, $SD = 11.2$ Jahre). Die jährliche Fahrleistung betrug im Durchschnitt 9.76 km ($SD = 9.4$ km). Die Teilnehmer wurden aus einem bestehenden WIVW Testfahrerpool ausgewählt und erhielten ein Simulator Testfahrertraining vor Studienbeginn. Das standardisierte Training (Hoffmann & Buld, 2006) hat das Ziel, die Teilnehmer mit dem Fahrsimulator und der Fahrt im Fahrsimulator vertraut zu machen (z.B. beschleunigen, bremsen, Kurvenfahren und wenden, um die Wahrscheinlichkeit der Übelkeit im Fahrsimulator (auf Englisch „*simulator sickness*“) zu reduzieren. Drei Probanden mussten wegen Nichteinhaltung oder Fehlinterpretation der Anweisung ausgeschlossen werden. Die Teilnehmer erhielten eine Aufwandsentschädigung von 25 Euro für die Teilnahme an der Studie.

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Subjektive Datenbasis

Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = .05$ angenommen. Bei einer Verletzung der Sphärizität wurde die Greenhouse Geisser (GG) Korrektur eingesetzt. Das partielle η^2 wurde als Maß für die Effektgröße angegeben (Bortz, 2005). Zunächst sollen die Ergebnisse der subjektiven Bewertungen hinsichtlich wahrgenommener Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität erläutert werden und im zweiten Schritt der Zusammenhang mit den Fahrdaten dargestellt werden.

Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der dreifaktoriellen Varianzanalyse. Dabei ergaben sich drei signifikante Haupteffekt, aber keine Wechselwirkungen. Abbildung 24 zeigt die Hauptwirkungen der einzelnen Stufen. Bonferroni korrigierte Post-Hoc t-Tests zeigten, dass sich alle drei Levels der Verzögerung signifikant unterschieden: Je stärker das Fahrzeug auf der Nebenspur verzögerte, umso

kooperativer wurde es wahrgenommen. Hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen dem Umfang der Geschwindigkeitsreduktion auf die wahrgenommene Kooperationsbereitschaft zeigten Bonferroni korrigierte Post-Hoc t-Tests, dass sich 7 m/s nicht signifikant von 4 m/s unterschied. Der Unterschied für die Stufen 7 m/s und 2 m/s wurde signifikant. Somit konnte geschlussfolgert werden, dass je schneller das Fahrzeug auf der Nebenspur Geschwindigkeit abgebaut hatte, umso kooperativer wurde es wahrgenommen, wobei der Unterschied zwischen 7 m/s und 4 m/s nicht signifikant geworden ist.

Tabelle 11. Darstellung der Ergebnisse für die AV wahrgenommene Kooperationsbereitschaftsbereitschaft.

Beschreibung der UVs	<i>F</i>	<i>df1</i>	<i>df2</i>	<i>p</i>	η^2
Reaktionszeit	63.8	2	48	.000	.727
Verzögerung	83.0	2	48	.000	.776
Umfang der Geschwindigkeitsreduktion	30.9	2	48	.000	.563
Reaktionszeit * Verzögerung	2.1	4	96	.086	.081
Reaktionszeit * Umfang der Geschwindigkeitsreduktion	0.4	4	96	.825	.015
Verzögerung * Umfang der Geschwindigkeitsreduktion	1.2	4	96	.316	.048
Reaktionszeit*Verzögerung* Umfang der Geschwindigkeitsreduktion	1.2	8	192	.320	.046

Bezüglich der Reaktionszeit ergaben Bonferroni korrigierte Post-Hoc t-Tests, dass sich alle drei Levels der Reaktionszeit signifikant voneinander unterschieden: Je schneller das Fahrzeug auf der Nebenspur reagiert hat, umso kooperativer wurde es wahrgenommen.

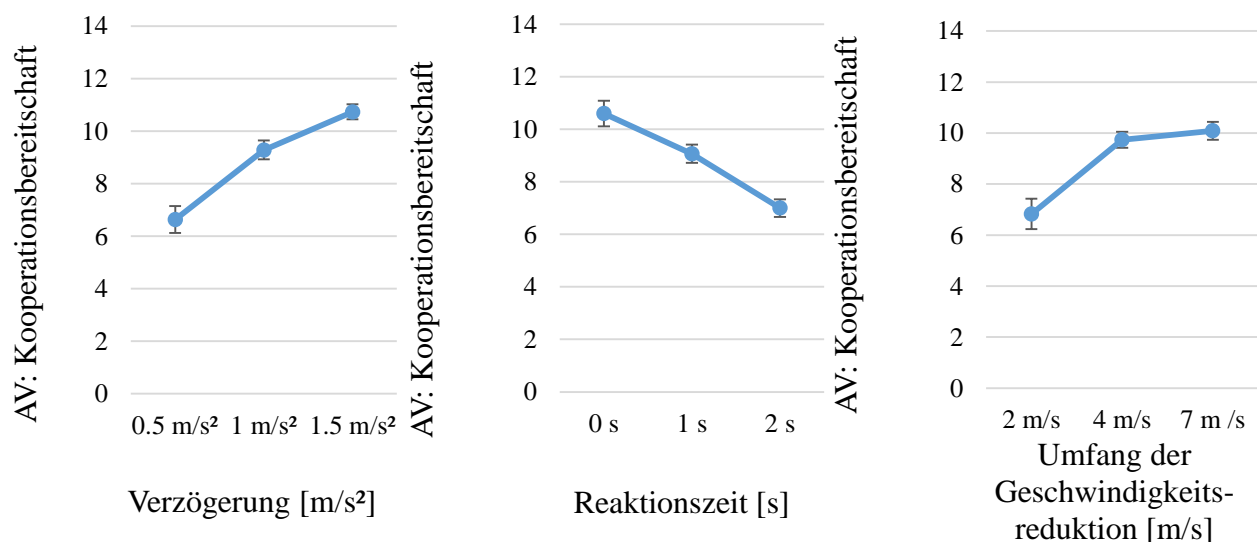


Abbildung 24. Mittelwert und Standardfehler von wahrgenommener Kooperationsbereitschaft bezogen auf die Ausprägungen der UV Verzögerung, Reaktionszeit und Umfang der Geschwindigkeitsreduktion.

Auch bei wahrgenommener Kritikalität fanden sich ähnlich wie bei der wahrgenommenen Kooperationsbereitschaft drei signifikante Haupteffekte ohne Interaktionseffekte (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12. Darstellung der Ergebnisse für die AV Wahrgenommene Kritikalität.

Beschreibung der UVs	<i>F</i>	<i>df1</i>	<i>df2</i>	<i>p</i>	η^2
Reaktionszeit	33.0	2	48	.000	.579
Verzögerung	50.3	2	48	.000	.677
Umfang der Geschwindigkeitsreduktion	29.6	2	48	.000	.553
Reaktionszeit * Verzögerung	0.1	4	96	.981	.004
Reaktionszeit * Umfang der Geschwindigkeitsreduktion (GG*)	1.7	2.63	63.24	.185	.065
Verzögerung * Umfang der Geschwindigkeitsreduktion (GG)	1.9	2.96	71.16	.134	.074
Reaktionszeit * Verzögerung * Umfang der Geschwindigkeitsreduktion (GG)	1.5	8	121.76	.146	.060

*GG Korrektur bei Verletzung der Sphärizität

Bonferroni korrigierte Post-Hoc t-Tests ergaben einen signifikanten unidirektionalen Einfluss für alle Level der unabhängigen Variablen (siehe Abbildung 25). Höhere Verzögerungen und Umfang der Geschwindigkeitsreduktionen führten zur Wahl einer geringeren wahrgenommenen Kritikalität, während niedrigere Werte der Reaktionszeit zu niedrigeren Kritikalitätswerten führten.

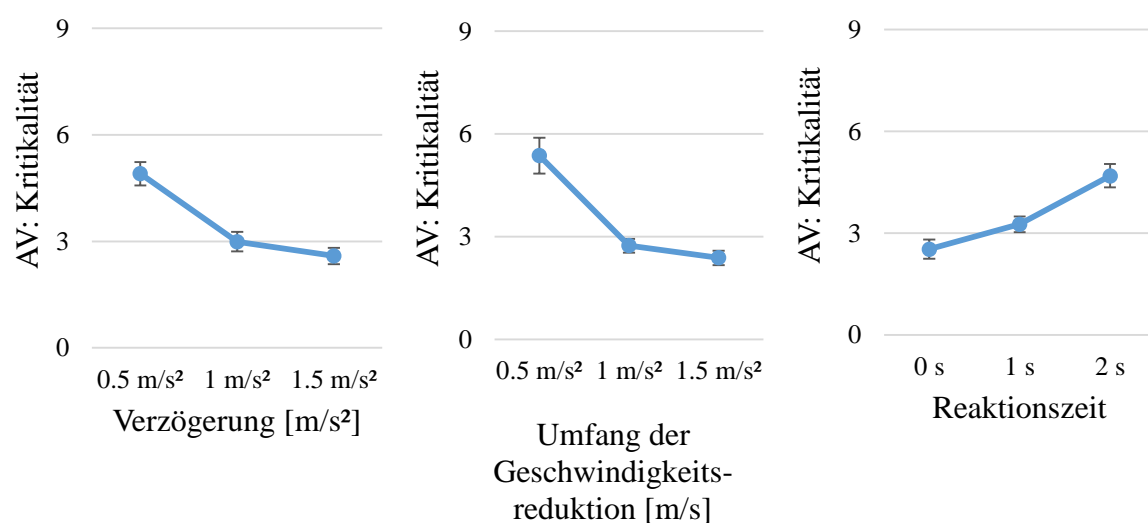


Abbildung 25. Mittelwert und Standardfehler von wahrgenommener Kritikalität bezogen auf die Ausprägungen der UV Verzögerung, Reaktionszeit und Umfang der Geschwindigkeitsreduktion.

Wahrgenommene Eindeutigkeit

Hinsichtlich der wahrgenommenen Eindeutigkeit konnten ebenfalls drei signifikante Haupteffekte gefunden werden als auch Interaktionseffekte (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13. Darstellung der Ergebnisse für die AV Wahrgenommene Eindeutigkeit.

Beschreibung der UVs	<i>F</i>	<i>df1</i>	<i>df2</i>	<i>p</i>	η^2
Reaktionszeit	26.0	2	48	.000	.520
Verzögerung	47.1	2	48	.000	.663
Umfang der Geschwindigkeitsreduktion (GG)	5.9	1.24	29.80	.015	.200
Reaktionszeit * Verzögerung (GG)	2.4	2.85	68.43	.075	.092
Reaktionszeit * Umfang der Geschwindigkeitsreduktion (GG)	1.9	3.07	73.84	.142	.072
Verzögerung * Umfang der Geschwindigkeitsreduktion (GG)	7.3	2.82	67.73	.000	.232
Reaktionszeit*Verzögerung * Umfang der Geschwindigkeitsreduktion	8	2.56	192	.011	.096

*GG Korrektur bei Verletzung der Sphärizität

Je schneller der Fahrgänger reagierte, umso eindeutiger wurde er wahrgenommen. Aufgrund der signifikanten Interaktion zwischen der Verzögerung und dem Umfang der Geschwindigkeitsreduktion bzw. der signifikanten dreifachen Interaktion zwischen den UVs, konnten die Haupteffekte nicht allein für sich interpretiert werden. Der Plot in Abbildung 26 wies überwiegend denselben Trend bei dem Umfang der Geschwindigkeitsreduktion von 4 m/s² und 8 m/s² auf. Diese Plots zeigten auf, dass je stärker verzögert und Geschwindigkeit abgebaut und je schneller reagiert wurde, desto eindeutiger wurde die Situation wahrgenommen. Die schwach signifikante dreifach Interaktion könnte durch den Plot von dem Umfang der Geschwindigkeitsreduktion von 2 m/s zustande gekommen sein. Der Plot mit dem Umfang der Geschwindigkeitsreduktion von 2 m/s könnte zudem deswegen als weniger eindeutig bewertet worden sein, weil die kurze Verzögerungsdauer von umgerechnet 1.33 s (2 m/s) und der zugleich geringen Geschwindigkeitsänderung ggf. von den Teilnehmern nicht registriert wurde. Dies unterstreicht die Tatsache, dass die Mittelwerte der Verzögerungen nicht signifikant unterschiedlich voneinander waren.

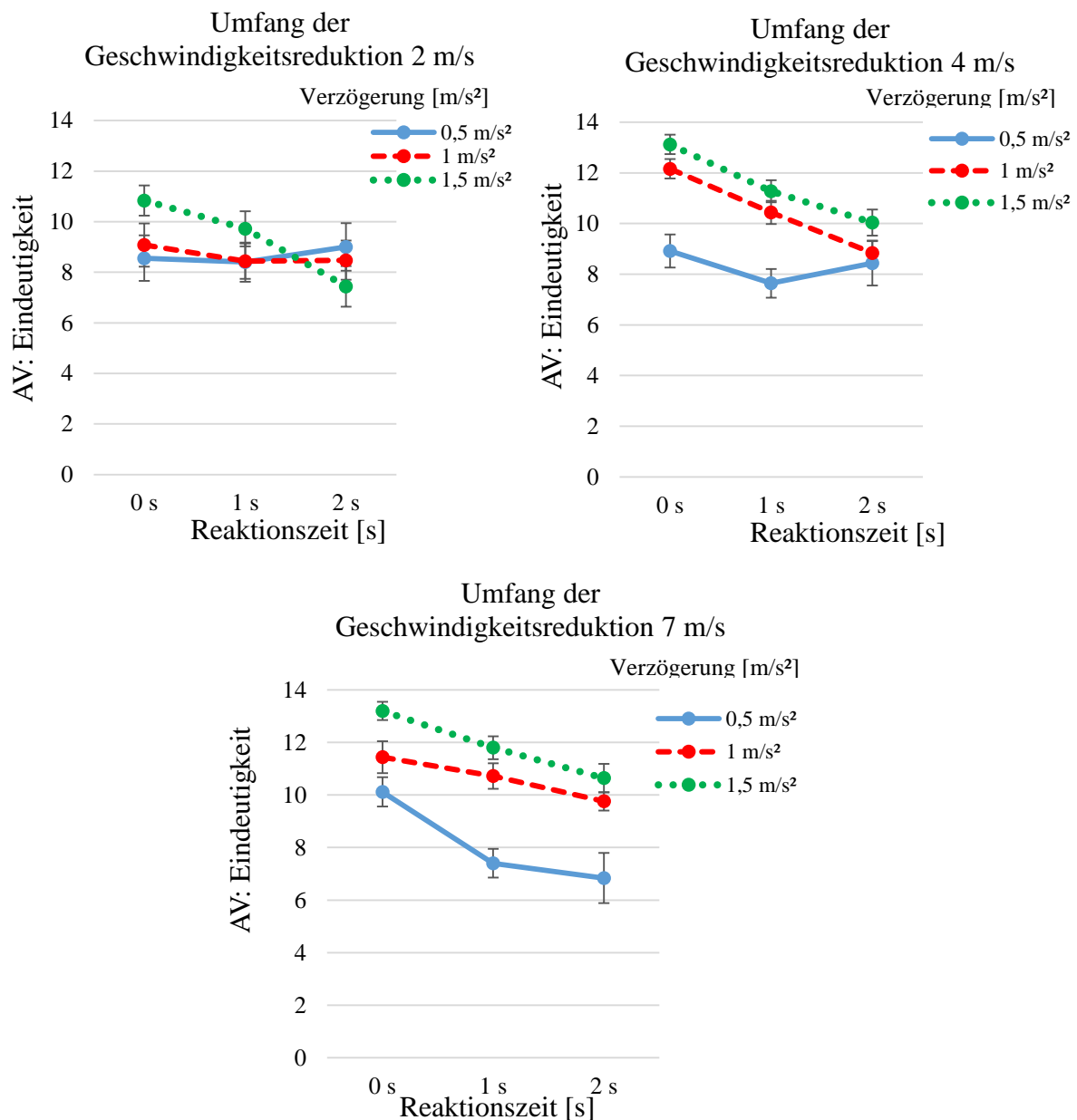


Abbildung 26. Mittelwert und Standardfehler von wahrgenommener Eindeutigkeit bezogen auf die Ausprägungen der UV Umfang der Geschwindigkeitsreduktion, Verzögerung und Reaktionszeit.

6.3.2 Fahrdaten

Im Folgenden wurden die Fahrdaten einer näheren Betrachtung unterzogen. Dies hatte zum einen den Grund zu untersuchen, ob die objektiven Fahrdaten die subjektive Datenbasis stützt, zum anderen dienten die dargestellten Fahrdaten der Definition des Wertebereichs der unabhängigen Variablen für die folgenden Studien (Kap. 7 und 8).

Die Analyse der Fahrdaten erfolgte mittels der Software Matlab Version 2015b.

Zusammenhang zwischen subjektiven Datenbasis und Fahrdaten

Zusammenfassend zeigt die Studie, wie in Kap. 6.2.1 beschrieben, drei additive Haupteffekte hinsichtlich Verzögerung, Umfang der Geschwindigkeitsreduktion und Reaktionszeit auf die wahrgenommene Kooperationsbereitschaft und Kritikalität. Darauf basierend stellt sich die Forschungsfrage, ob sich die subjektive Bewertung in den objektiven Fahrdaten widerspiegeln. Wie in der Theorie hinsichtlich der Phasen des Fahrstreifenwechsels in Kap 2.4.4 beschrieben, zeigen Menschen ein Absicherungsverhalten, bevor Sie den eigentlichen Fahrtstreifenwechsel durchführen. Dies äußert sich durch Blicke in die Außen-, Innen- und Seitenspiegel bzw. anhand der Kopfbewegung (Cheng & Trivedi, 2006), um sicher zu sein, einen Fahrstreifenwechsel durchführen zu können (Henning, 2010). Dieses Verhalten des Fahrers zeigt sich anhand von drei Parametern im Fahrverhalten (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14. Relevante Kennwerte des Fahrstreifenwechsels in der ersten Studie.

Kennwerte Einscherer	Einheit
Dauer Blinkersetzung	[s]
Verweilzeit	[s]
Fahrstreifenwechseldauer	[s]

Die Probanden mussten in der ersten Studie insgesamt 27 Situationen bewerten. Jede Situation spiegelte dabei eine bestimmte Parameterkombination wieder (siehe Anhang A4).

Die genannten Parameter sollen nun deskriptiv beschrieben werden, um Aufschluss über einen potentiellen Zusammenhang zwischen der subjektiven Bewertung von Kritikalität und Kooperationsbereitschaft und der Reaktion des Einscherers zu bekommen.

Spurwechseldurchführung

In Abbildung 27 ist eine Übersicht der Häufigkeiten von erfolgten vs. nicht erfolgten Spurwechseln zu sehen. Insgesamt wurden über alle Situationen hinweg 558 Spurwechsel von 675 möglichen Spurwechseln durchgeführt. Interessant sind vor allem Situation 8, 9 und 18, in denen die häufigste Anzahl nicht durchgeführter Spurwechsel vorkommen. Um zu validieren, ob sich die Häufigkeiten nur zufällig in den einzelnen Situationen unterscheiden wurde der Test nach Cochran's Q Test gewählt.

H1: Das Verhältnis von Spurwechsel durchgeführt zu nicht durchgeführt ist über die Situationen hinweg nicht gleich.

Es zeigte sich ein signifikantes Ergebnis d.h. es gibt Situationen, in denen häufig nicht gewechselt und Situationen, in denen häufig gewechselt wurde $\chi^2(26) = 214.92; p < .001$.

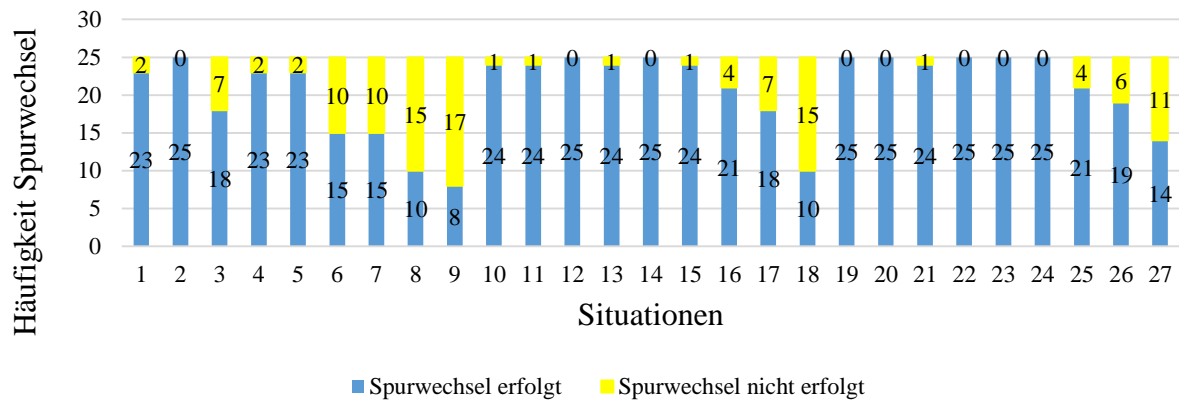


Abbildung 27. Vergleich der Häufigkeiten hinsichtlich Spurwechseldurchführung.

Die Situation 19 (Parameterkombination: 0 s, 7 m/s, 1.5 m/s²) und 20 (Parameterkombination: 1 s, 7 m/s, 1.5 m/s²) stellen Situationen dar, die subjektiv als sehr kooperativ gesehen wurden. Um den Zusammenhang zu untersuchen, wurde eine punktbiserale Korrelation zwischen Kritikalität und Spurwechseldurchführung berechnet. Es zeigte sich ein moderater Zusammenhang ($r = -.304, p < .001, N = 25$). Je kritischer die Situation wahrgenommen wurde, desto weniger wurde die Spur gewechselt.

Blinkdauer

Die Blinkdauer wurde definiert als die Zeitspanne zwischen Blinker Betätigung bis zum Zeitpunkt der Beendigung des Blinkers. Die durchschnittliche Blinkdauer betrug $M = 8.2$ s ($SD = 3.5$ s; Min = 3.5 s; Max = 9.8 s).

Basierend auf der in Kap. 2.4.4 genannten Literatur wurden folgende einseitige Hypothesen angenommen:

H1: Je kooperativer die Situation wahrgenommen wird, desto kürzer wird geblinkt.

H2: Je kritischer die Situation wahrgenommen wird, desto länger wird geblinkt.

Um den Zusammenhang zu berechnen wurden Korrelationen nach Pearson (Bortz, 2005) berechnet. Hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen wahrgenommener Kooperation und Blinkdauer konnte kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden ($r = -.209, p = .148, N = 25$). Ebenso wenig zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Kritikalität und der Blinkdauer ($r = .158, p = .216, N = 25$) (siehe Abbildung 28).

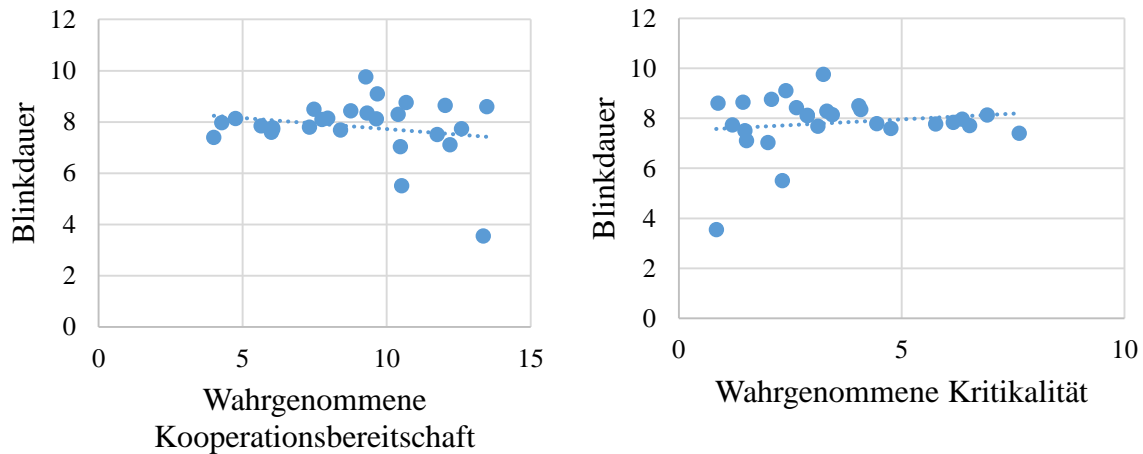


Abbildung 28. Zusammenhang zwischen Wahrgenommener Kooperationsbereitschaft und Blinkdauer und zwischen wahrgenommener Kritikalität und Blinkdauer.

Verweilzeit

Darunter wird in dieser Arbeit die Zeitspanne verstanden, die verstreicht, bis das blinkende Fahrzeug auf die Verzögerung des Folgefahrers auf der Zielspur reagiert. Diese Reaktion wird anhand der Plots auf eine Quergeschwindigkeit von 0.3 m/s festgelegt, da ab diesem Wert von einem tatsächlichen Fahrstreifenwechsel ausgegangen werden kann und keiner zufälligen Schwankung in der Spur entspricht (siehe Abbildung 29). Die durchschnittliche Verweilzeit betrug $M = 4.5$ s ($SD = 2.1$ s; Min = 2.4 s; Max = 9.4 s).

Basierend auf der in Kap. 2.4.4 genannten Literatur wurden folgende einseitige Hypothesen angenommen:

H1: Je kooperativer die Situation wahrgenommen wird, desto schneller wird reagiert.

H2: Je kritischer die Situation wahrgenommen wird, desto später wird reagiert.

Um den Zusammenhang zu berechnen wurden Korrelationen nach Pearson berechnet. Hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen wahrgenommener Kooperation und Verweilzeit konnte ein moderater Zusammenhang festgestellt werden. Je kooperativer der Folgefahrer wahrgenommen wurde, desto schneller wurde reagiert ($r = -.357$, $p = .034$, $N = 25$). Hinsichtlich der H2 zeigte sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Kritikalität und der Verweilzeit ($r = .186$, $p = .176$, $N = 25$).

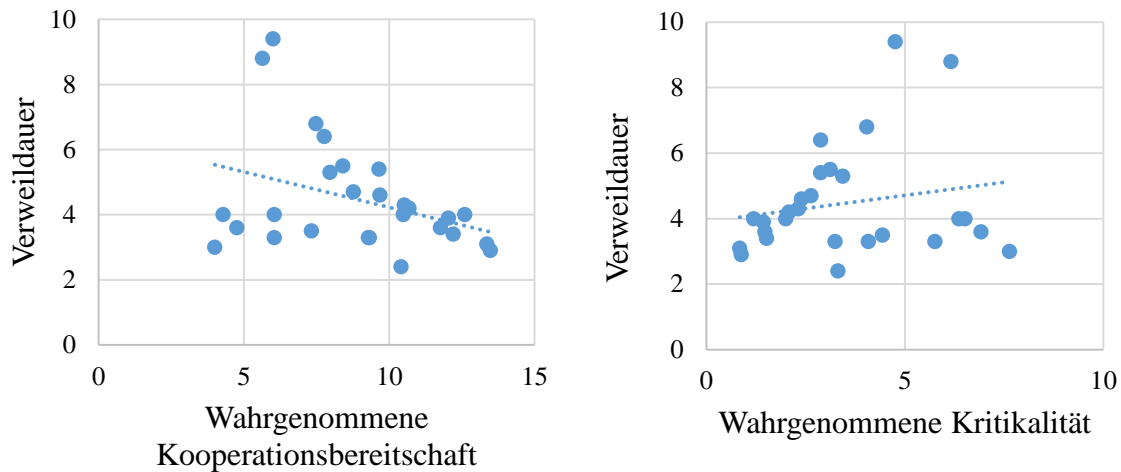


Abbildung 29. Zusammenhang zwischen Wahrgenommener Kooperationsbereitschaft und Verweilzeit und zwischen wahrgenommener Kritikalität und Verweildauer.

Fahrstreifenwechseldauer

Die Fahrstreifenwechseldauer ist hier definiert als die Zeitspanne zwischen dem Beginn des Querversatzes in Richtung der Fahrbahnmarkierung bis sich der Schwerpunkt des Fahrzeuges auf der anderen Spur befindet. Die entsprechenden Durchschnittswerte je nach Situation sind in Abbildung 30 ersichtlich. Im Mittel zeigte sich eine Fahrstreifenwechseldauer von $M = 8.2$ s ($SD = 2.5$ s; Min = 6.9 s; Max = 9.7 s).

Basierend auf der in Kap. 2.4.4 genannten Literatur werden folgende einseitige Hypothesen angenommen:

H1: Je kooperativer die Situation wahrgenommen wird, desto schneller wird der Fahrstreifen gewechselt.

H2: Je kritischer die Situation wahrgenommen wird, desto langsamer wird der Fahrstreifen gewechselt.

Um den Zusammenhang zu berechnen wurden Korrelationen nach Pearson berechnet. Hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen wahrgenommener Kooperation und Fahrstreifenwechseldauer konnte ein moderater Zusammenhang festgestellt werden ($r = -.345$, $p = .039$, $N = 25$). Hinsichtlich der H2 zeigte sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Kritikalität und der Fahrstreifenwechseldauer ($r = .263$, $p = .093$, $N = 25$). Dies könnte damit zusammenhängen, dass die Situation im Niedriggeschwindigkeitsbereich generell als nicht sicherheitskritisch von den Probanden wahrgenommen wurde.

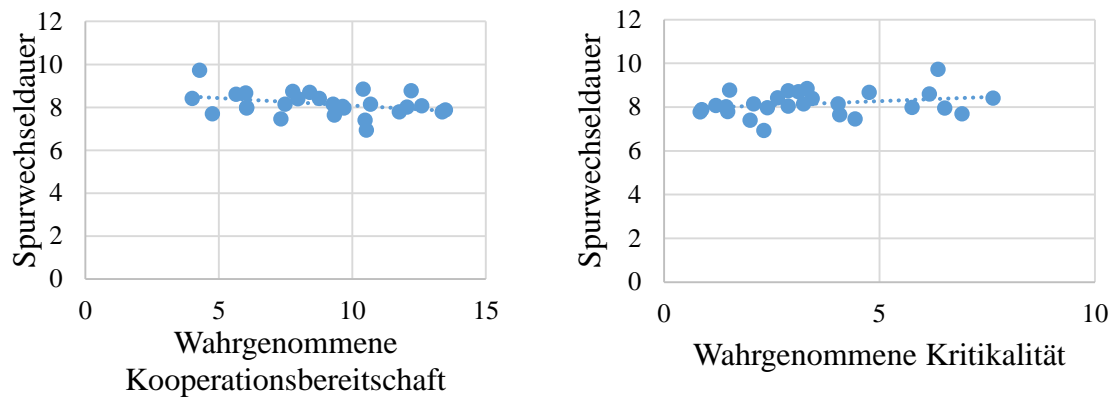


Abbildung 30. Zusammenhang zwischen Wahrgenommener Kooperationsbereitschaft und Spurwechseldauer und zwischen wahrgenommener Kritikalität und Spurwechseldauer.

Deskriptive Analyse des Fahrstreifenwechselverhaltens

Ziel der Fahrdatenanalyse war es, eine Basis und Orientierung für die Modellierung der Parameter des simulierten Einscherers für nachfolgende Studien (Kap. 7 & Kap. 8) zu liefern, in der die Teilnehmer die Perspektive des Folgefahrers einnehmen. Die Analyse der Fahrdaten erfolgt mittels der Software Matlab Version 2015b hinsichtlich der für die Arbeit interessanten Kennwerte (siehe Tabelle 15). Im Folgenden werden die wichtigsten Parameter des Einscherverhaltens aufgezeigt und kurz erläutert.

Tabelle 15. Relevante Kennwerte des Fahrstreifenwechsels in der ersten Studie.

Kennwerte Einscherer	Einheit
Longitudinale Beschleunigung	[s]
Abstand zu Folgefahrer	[m]
Laterale Position	[m]

Betrachtung des Parameters longitudinale Beschleunigung

In der Abbildung 31 wird die durchschnittliche Längsbeschleunigung pro Situation aufgezeigt. Definiert wird sie als das Maximum an Längsbeschleunigung. Es zeigte sich ein durchschnittlicher Wert von $M = 2.1 \text{ m/s}^2$ ($SD = 0.8 \text{ m/s}^2$; Min = 1.5 m/s^2 ; Max = 2.5 m/s^2). Ähnlich zu Abbildung 31 den Verlauf der Längsbeschleunigung über alle Situationen hinweg, wobei die farbig markierten Linien die Längsbeschleunigungskurven der einzelnen Probanden darstellen und die fett geplottete Linie den Mittelwert über alle Probanden hinweg.

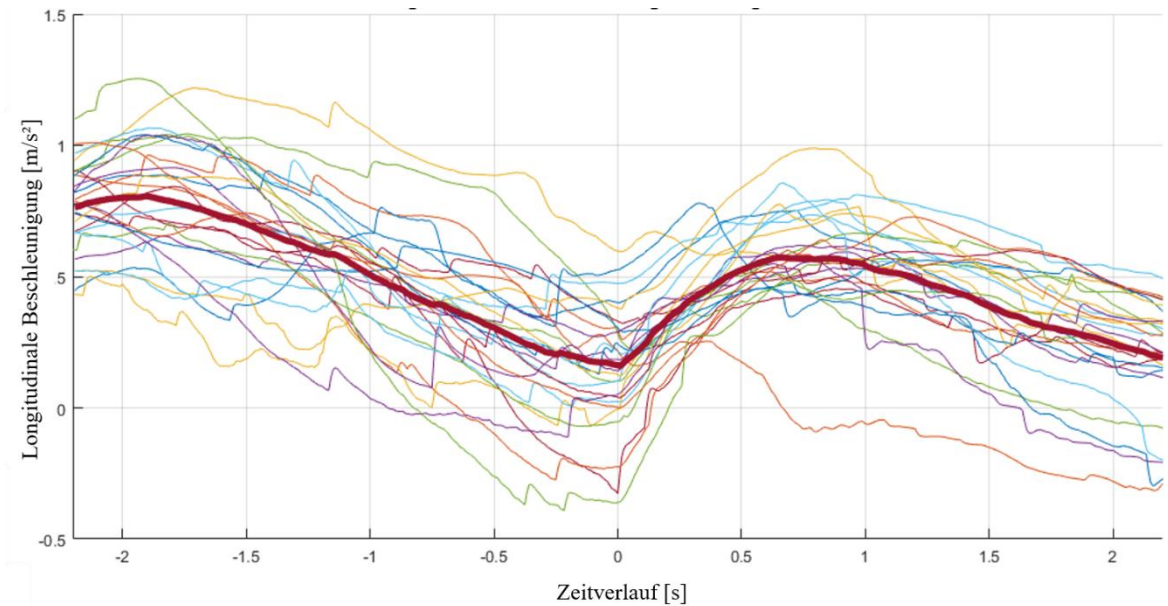


Abbildung 31. Zeitverlaufskurve der longitudinalen Beschleunigung über alle Probanden und Situationen. 0 s beschreibt dabei den Zeitpunkt des Überquerens der Fahrbahnmarkierung.

Betrachtung des Parameters Abstand zum Folgefahrer

Der Abstand zum Folgefahrer ist definiert den Zeitpunkt ab der Blinkersetzung. Im Mittel zeigten die Fahrer einen Abstand von $M = 12.9$ m ($SD = 4.1$ s; Min = 11.1 m; Max = 16.1 m).

Betrachtung der Parameter laterale Position und Dauer laterale Positionierung

Die laterale Position ist definiert als der Abstand von Fahrzeugmitte zu Fahrspurmittellinie, wobei Null bedeutet, dass das Fahrzeug innerhalb der Fahrspur zentriert ist und positive Werte bedeuten, dass sich das Fahrzeug links von der Mitte zu der Fahrbahnmarkierung bewegt. Die laterale Position wurde zum Zeitpunkt 3 Sekunden vor der Durchführung des Spurwechsels definiert (Olsen, 2003). Es zeigte sich im Mittel eine laterale Position von 0.3 m ($SD = 0.2$ m; Min = 0.2 m; Max = 0.4 m) und eine durchschnittliche Dauer von 2.3 s ($SD = 0.9$ s; Min = 1.1 s; Max = 3.9 s).

Wie in Kap. 2.4.4 erläutert besteht der Spurwechsel aus verschiedenen Phasen, die durchlaufen werden, angefangen mit der Entscheidung für einen Spurwechsel, basierend auf unterschiedlichen Motiven (siehe Kap. 2.4.3), über die Vorbereitungsphase, die in dieser Arbeit näher beleuchtet wird, bis hin zu einer Durchführungs- und Abschlussphase. Die Abschlussphase ist dadurch gekennzeichnet, dass der Schwerpunkt des Fahrzeuges vollständig auf der Fahrbahn der Zielspur positioniert ist (Lee, Olsen, & Wierwille, 2004). Die ermittelten Mittelwerte dienten als Orientierung für Parametrierung der UVs des einscherenden Fahrzeuges in den folgenden Studien 7 und 8. Hier sollte aus der Perspektive des Folgefahrers die Spurwechselankündigung des einscherenden Fahrers beurteilt werden.

6.4 Diskussion

Ziel dieser Studie war es, herauszufinden, wie der Folgefahrer von außen wahrgenommen wurde bezogen auf Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität und bei welchen Schwellenwerten es zu einem Fahrstreifenwechsel kam. Dazu wurde eine Fahrsimulatorstudie im statischen Fahrsimulator mit Teilnehmern auf einer dreispurigen Autobahn im Niedriggeschwindigkeitsbereich durchgeführt. Kolonnen von Fahrzeugen fuhren auf der mittleren Fahrbahn. Bei Blinkersetzung seitens des Fahrers auf der rechten Fahrspur bremste der simulierte Folgefahrer mit einer Fahrparameterkombination basierend auf den drei unabhängigen Variablen Verzögerung, Umfang der Geschwindigkeitsreduktion und Reaktionszeit. Die Probanden auf der rechten Spur mussten ihren Fahrstreifenwechsel durch Blinkersetzung ankündigen und sich dann entscheiden, ob ein Fahrstreifenwechsel möglich wäre, basierend auf dem Fahrverhalten des reagierenden Folgefahrers und diesen danach hinsichtlich wahrgenommener Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität bewerten. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Bezogen auf wahrgenommene Kooperationsbereitschaft zeigten sich drei signifikante Haupteffekte für die Verzögerung, Umfang der Geschwindigkeitsreduktion und Reaktionszeit. Diese können additiv interpretiert werden. Je stärker verzögert wurde, umso kooperativer wurde der Folgefahrer wahrgenommen. Verzögerung von 1.5 m/s² waren ausreichend, um als kooperativ wahrgenommen zu werden. Ein ähnliches Ergebnis zeigte sich für den Umfang der Geschwindigkeitsreduktion. Je mehr Geschwindigkeit abgebaut wurde desto kooperativer wurde der Folgefahrer wahrgenommen, wobei sich zwischen 4 m/s und 7 m/s kein signifikanter Unterschied zeigte. Dies entspricht einem Geschwindigkeitsabbau von 48 % und 80 %. Bezogen auf die Reaktionszeit zeigte sich, dass je schneller reagiert wurde, desto kooperativer wurde der Folgefahrer bewertet.

Bezogen auf die Eindeutigkeit des Fahrverhaltens zeigten sich ebenfalls drei signifikante Haupteffekte und eine signifikante zweifache und dreifache Interaktion. Je schneller reagiert wurde und je stärker verzögert und Geschwindigkeit abgebaut wurde, umso eindeutiger wurde das Bremsverhalten des Folgefahrers wahrgenommen. Bezogen auf den Umfang der Geschwindigkeitsreduktion und die Verzögerung kann für die Verzögerung und die Stufen 4 m/s und 8 m/s des Faktors Umfang der Geschwindigkeitsreduktion gesagt werden, dass je stärker gebremst wurde und je mehr Geschwindigkeit abgebaut wurde, umso eindeutiger wurde die Situation wahrgenommen. Dies könnte wiederum mit der Signalentdeckungstheorie (Green & Swets, 1966) erklärt werden, die damit argumentiert, dass, wenn die Reizintensität steigt, dieser salienter und somit schneller entdeckt wird. Der Umfang der Geschwindigkeitsreduktion

von 2 m/s zeigte abweichende Ergebnisse, was dadurch zustande gekommen sein könnte, dass die Bewegung von den Teilnehmern aufgrund der Schnelligkeit und der schwachen Ausprägung kaum registriert wurde. Die Ergebnisse finden sich in der Literatur wieder, nach der Menschen eine klar und schnelle Reaktion bezogen auf ihr Handeln bevorzugen (Habibovic et al., 2016) und eine eindeutige Kommunikation als positiv erachten (Simon & Bullinger, 2017).

Die Ergebnisse der Kritikalität gehen einher mit den Ergebnissen der wahrgenommenen Kooperationsbereitschaft. Es zeigten sich auch hier drei signifikante Haupteffekte. Je schwächer die Stufen der unabhängigen Variablen, desto kritischer wurde die Situation betrachtet. Im Gesamten waren die Werte dennoch eher im niedrigen Bereich, was sich damit argumentieren lässt, dass die Situationen aufgrund des Settings auf der Autobahn im Niedriggeschwindigkeitsbereich zwischen 10 km/h und 30 km/h nie eine derart kritische Situation aufkommen lassen, wie es beispielsweise bei höheren Geschwindigkeiten oder bei unerwarteten Ereignissen (Neukum, Naujoks, Kappes, & Wey, 2014) der Fall wäre.

Die Ergebnisse hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen subjektiven Bewertungen und den Fahrdaten unterstützen hinsichtlich Fahrstreifenwechseldauer und Reaktionszeit die subjektiven Ergebnisse. Je kooperativer die Situation wahrgenommen wurde, umso schneller wurde reagiert bzw. die Spur gewechselt. Die Ergebnisse gehen mit der bestehenden Literatur einher (Henning, 2010). Das Ergebnis ließ sich jedoch nicht bei der Blinkdauer bestätigen. Hinsichtlich der Generalisierbarkeit der Ergebnisse auf den Realverkehr muss betont werden, dass die Studie im Fahrsimulator durchgeführt wurde. Dies bringt den Vorteil einer hohen internen Validität, als auch die Reproduzierbarkeit der Situation, Kontrollierbarkeit des Settings und eine Standardisierung mit sich (De Winter, Leeuwen, & Happee, 2012). Eine Einschränkung ist dennoch die geringe externe Validität im Vergleich zu Realverkehrsstudien. Somit ist ein Abgleich in einem realen Verkehrsetting wichtig. Zusammenfassend lieferte die Studie wichtige Einblicke auf welche Parameter und mit welcher Gewichtung Fahrzeuge die, die Spur wechseln wollen, Wert legen. Dies kann als Basis für die Weiterentwicklung bestehender Fahrerassistenzsysteme der Längsführung genutzt werden. Zusätzlich liefern die objektiven Fahrdaten die Basis für die nachfolgenden Studien aus Folgefahrer Perspektive.

7 Untersuchung der Außenwirkung des Einscherers in einer Fahrstreifenwechselsituation I

7.1 Einleitung

Ziel der ersten Studie (Kap. 6) war es zu verstehen, auf welche Indikatoren Fahrer, die einen Fahrstreifenwechsel durchführen möchten, achten und ab welchen Schwellenwerten sie das Verhalten des Folgefahrers als kooperativ erachten. Zusätzlich sollte die Analyse der Fahrdaten der Teilnehmer die Basis für die Wahl der Wertebereiche der Parameter bei der Fahrstreifenwechselankündigung in den nachfolgenden Studien liefern.

In dieser Studie wurde die Fahrstreifenwechselankündigung aus der Perspektive des Folgefahrers analysiert. Basierend auf der Literatur der Objektprädiktion ist bekannt, dass bestimmte Parameter als Indikator für einen Fahrstreifenwechsel fungieren. Zudem rufen bestimmte Parameter gewisse Assoziationen hervor (siehe Kap. 2.1.1). Beispielsweise kann ein knappes Einscheren bzw. eine kurze Spurwechseldauer als bewusste aggressive Handlung des Einscherers ausgelegt werden (Ellinghaus, 1986; Tasca, 2000). Dieses Verhalten kann im Sinne des fundamentalen Attributionsfehlers nach Gilbert und Malone (1995) wiederum von dem Folgefahrer auf sich bezogen werden. Dies könnte ggf. zu einer aggressiven Reaktion seinerseits führen. Auch ein Verhalten, das als uneindeutig interpretiert wird, könnte den Fahrer beunruhigen und zu einer kritischen Situation führen, da in dieser Situation nicht ersichtlich ist, wie gehandelt werden muss (Simon & Bullinger, 2017). Aufgrund dessen ist es wichtig zu verstehen, wie in diesem Zusammenhang eine positive Außenwirkung erzielt werden kann.

In der aktuellen Literatur wurde dies jedoch bis dato nur auf qualitativer Ebene betrachtet (Ellinghaus, 1986; Maag, 2004). Zusätzlich bezieht sich die Literatur hierzu nur auf einzelne Verhaltensweisen, jedoch nicht darauf, wie Verhaltensweisen im Zusammenspiel miteinander wirken können. Für die Auslegung einer kooperativen automatisierten Spurwechselassistenten ist es jedoch notwendig Anhaltspunkte diesbezüglich als auch hinsichtlich des Wertebereichs zur Orientierung nutzen zu können. Gerade Fahrstreifenwechsel gelten als eine der riskantesten Manöver im Straßenverkehr (Ammoun, Nashashibi, & Laurgeau, 2007).

Somit soll in diesem Kapitel folgender Forschungsfrage nachgegangen werden:

Was bedeutet kooperatives Interagieren im Fahrstreifenwechselszenario zwischen menschlichen Verkehrsteilnehmern aus der Folgefahrer Perspektive?

In **Kap. 7.2** wird nach Beschreibung der Forschungsfragen näher auf die einzelnen Punkte der Untersuchungsmethodik eingegangen. Nach der Darstellung der subjektiven Ergebnisse und Fahrdaten (**Kap. 7.3**), wird ein weiterer Faktor in der weiterführenden Studie hinzugenommen, um für die Kondition der Blinkersetzung von 12 m zu untersuchen, ob eine Variation der longitudinalen Beschleunigung eine Verbesserung der Ergebnisse erzielen kann (**Kap. 7.4**). Im Anschluss werden die Ergebnisse berichtet (**Kap. 7.5**). Die Gesamtdiskussion der Haupt- und weiterführenden Studie rundet das Kapitel ab (**Kap. 7.6**).

Hauptstudie

7.2 Untersuchungsmethodik

7.2.1 Versuchsdesign

Ziel der Studie war es, verschiedene Fahrstreifenwechselankündigungen hinsichtlich der Außenwirkung des Einscherers auf den Folgefahrer zu beurteilen. Daraus ergibt sich folgende Forschungsfrage und Hypothesen:

Forschungsfrage

Wie werden Fahrstreifenwechselankündigungen hinsichtlich wahrgenommener Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität beurteilt?

Hypothesen

Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft

H1: Es gibt einen Zusammenhang zwischen Blinkerstart und wahrgenommener Kooperationsbereitschaft

H2: Es gibt einen Zusammenhang zwischen Verweilzeit und wahrgenommener Kooperationsbereitschaft

H3: Es gibt einen Zusammenhang zwischen Spurwechseldauer und wahrgenommener Kooperationsbereitschaft

Wahrgenommene Eindeutigkeit

H1: Es gibt einen Zusammenhang zwischen Blinkerstart und wahrgenommener Eindeutigkeit

H2: Es gibt einen Zusammenhang zwischen Verweilzeit und wahrgenommener Eindeutigkeit

H3: Es gibt einen Zusammenhang zwischen Spurwechseldauer und wahrgenommener Eindeutigkeit

Wahrgenommene Kritikalität

H1: Es gibt einen Zusammenhang zwischen Blinkerstart und wahrgenommener Kritikalität

H2: Es gibt einen Zusammenhang zwischen Verweilzeit und wahrgenommener Kritikalität

H3: Es gibt einen Zusammenhang zwischen Spurwechseldauer und wahrgenommener Kritikalität

Als Nebenfragestellung wurde untersucht, wie es sich im Fahrverhalten äußerte, wenn die Probanden explizit angewiesen wurden, sich kooperativ dem Einscherer gegenüber zu verhalten.

7.2.2 Fahrscenario

Die Teststrecke entspricht dem Szenario aus der Studie entsprechend Kap. 6. In dieser Studie fand ein Perspektivenwechsel statt (siehe Abbildung 32). Der Proband fuhr auf der mittleren Fahrspur mit 30 km/h einem Vorderfahrzeug mit einem Abstand von $THW = 2\text{ s}$ hinterher. Dieser Abstand wurde durch einen Enhanced Reality Strip (ERS, Frey, 2016) gewährleistet. Auf der rechten Spur kündigte in bestimmten Abständen ein Fahrzeug bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h seinen Fahrstreifenwechselwunsch an, basierend auf einer Parameterkombination der drei UVs. Daraus ergaben sich 27 Szenarien mit insgesamt 6 Kontrollsituationen, in denen keine Spurwechselankündigung stattfand.

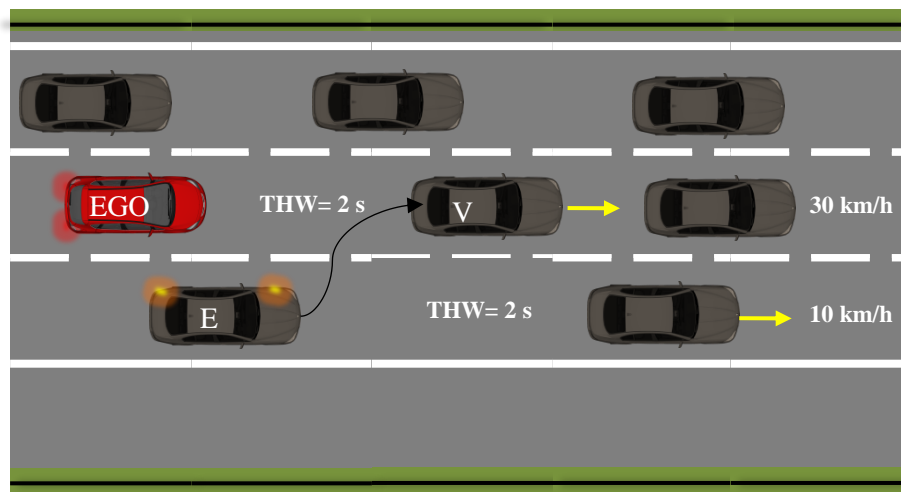


Abbildung 32. Darstellung des Fahrscenario. Der Proband (EGO) folgt einem Vorderfahrzeug auf der mittleren Spur und muss auf das einscherende Fahrzeug (E) reagieren und es bewerten.

7.2.3 Darstellung der unabhängigen und abhängigen Variablen

Unabhängige Variablen

Die Wahl der unabhängigen Variablen für die Fahrstreifenwechselankündigung basierte auf einem dreistufigen Prozess. Im ersten Schritt wurden, basierend auf der Literatur, Parameter selektiert, die den Fahrstreifenwechsel prädictieren und somit speziell in der Phase der Fahrstreifenwechselankündigung relevant sind (siehe Kap. 2.4.4). Da es darum geht, dass die Indikatoren vom umliegenden Verkehr wahrgenommen werden sollen, wird der Fokus auf Indikatoren basierend auf Fahrdaten gelegt. Fastenmeier et al. (2001) identifiziert in der Vorbereitungsphase bzw. Beginn der Durchführungsphase folgende Indikatoren: Dem Anzeigen der Intention durch Blinkersetzung. Dieser gilt als einer der aussagekräftigsten Indikatoren, die einen Fahrstreifenwechsel ankündigen und in der Straßenverkehrsordnung verankert sind (siehe Kap. 2.4.2), ist der Blinker (Dagli, Brost, & Breuel, 2003; Ehmanns, 2003; Faw, 2013). Ein weiterer Indikator umfasst nach Fastenmeier et al. (2001) das Sicherungsverhalten durch Absicherungsblicke in die Spiegel. Dies kann von dem umgebenden Verkehr als Verweilen auf der Spur betrachtet werden. Zusätzlich nennt er den Beginn der Spurwechseldurchführung und ggf. die longitudinale Beschleunigung auf der eigenen Spur, um sich der Geschwindigkeit auf der Zielspur anzupassen. Diese Parameter finden sich ebenfalls in der Literatur (Olsen, 2003; Toledo & Zohar, 2007). Rehder et al. (2016a) nennen noch die TTC bzw. den Abstand zwischen Einscherer und Folgefahrer. Basierend auf den genannten Parametern wurde im zweiten Schritt nach Merkmalen selektiert, die emotionsauslösend sind oder bestimmte Attributionen triggern. Hierzu wurde auf subjektive Befragungen aus der Literatur zurückgegriffen (Ellinghaus, 1986; Mizell, Joint, & Connell, 1997; Tasca, 2000). Darauf basierend wurden in der Hauptstudie die UVs Blinkerstart, Verweildauer und Spurwechseldauer ausgewählt und für die weiterführende Studie im Falle einer späteren Blinkersetzung die longitudinale Beschleunigung (siehe Tabelle 16). Die Festlegung des Wertebereichs basierte auf der Fahrdatenanalyse der ersten Studie (Kap. 6). In dieser Studie wurden folgende Werte ermittelt: Abstand zum Folgefahrer von $M = 12.9$ m ($SD = 4.1$ m), eine Verweildauer von $M = 4.5$ s ($SD = 2.1$ s) und eine Spurwechseldauer von $M = 8.2$ s ($SD = 2.5$ s).

Hinsichtlich der Ausprägung wurden die Parameter in Abhängigkeit von der Literatur (siehe Kap. 2.4.5) bzw. der deskriptiven Statistik der Fahrdaten von Studie 1 (Kap. 6.3.2) gewählt und in Pretests entsprechend dem MAX – KON – MIN Prinzip angepasst.

Tabelle 16. Darstellung der UVs.

Unabhängige Variablen	Ausprägung	Einheit	Definition
Blinkerstart	12, 16, 20	[m]	Distanz relativ zum Folgefahrer auf der Zielspur
Verweildauer	1, 2, 3	[s]	Zeitspanne von der Blinkersetzung bis zur Durchführung des Fahrstreifenwechsels
Spurwechseldauer	4, 6, 8	[s]	Zeitspanne, wenn sich der Schwerpunkt des Fahrzeuges von der eigenen Fahrspur auf die Zielfahrspur bewegt

Darauf basierend ergab sich ein 3x3x3 faktorieller Versuchsplan mit Messwiederholung.

Abhängige Variablen

Ziel war es, die Außenwahrnehmung der Spurwechselankündigung des Folgefahrers zu erfassen. Die abhängigen Variablen wurden entsprechend Studie 1 (siehe Kap. 6.1.1) gewählt. Somit sollte auch hier ein Verständnis generiert werden, ab welchen Schwellenwerten der Einscherer seine Intention eindeutig angezeigt hat und was auf Parameterebene seine Kooperationsbereitschaft signalisiert, um als Ziel die gewonnenen Erkenntnisse für die Auslegung eines kooperativen, automatisierten Spurwechselassistenten zu nutzen. Zusätzlich wurde noch die Kritikalität der Situation erfasst. Für die Erfassung der Konstrukte wurden wie in Studie Kap. 6 wiederum Single- Item Fragen verwendet, die sich direkt auf die Situation bezogen. Hierzu wurde den Probanden entsprechend nach Risser (1987) die Definition in Tabelle 17 gegeben.

Tabelle 17. Definition der abhängigen Variablen.

Subjektive Variablen AV	Definition
Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft	Der andere Fahrer ist kooperativ: Er nimmt Kontakt auf und ersucht mich ihn vor mir hineinzulassen. (Risser, 1987, S.70) Der andere Fahrer ist nicht kooperativ: Er wechselt, (dennoch unter Einsatz des Blinkers), aber ohne Kontakt aufzunehmen die Spur. (Risser, 1987, S.70)
Wahrgenommene Kritikalität	Kritikalität der Situation mit klar vorgegebenen Toleranzgrenzen (Neukum et al., 2008)
Wahrgenommene Eindeutigkeit	Die klare Erkennung der Intention des Einscherers. Der Fahrer weiß was er tun will, nachdem ich verzögert habe

Eine Darstellung der Fragen findet sich in Tabelle 18.

Tabelle 18. Übersicht über die abhängigen Variablen

Subjektive Variablen AV	Frage	Skala
Wahrgenommene Kritikalität	<i>Wie kritisch erschien die Situation?</i>	0 bis 10, Kritikalitätsskala (Neukum et al., 2008)
Wahrgenommene Eindeutigkeit	<i>Wie eindeutig hat der Fahrer seine Intention gezeigt?</i>	1 bis 15, Zusatzkategorie 0 (KU-Skala, Heller, 1985)
Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft	<i>Wie kooperativ war die Fahrstreifenwechselankündigung auf der rechten Spur?</i>	1 bis 15, Zusatzkategorie 0 (KU-Skala, Heller, 1985)

7.2.4 Fahrsimulator

Die Studie wurde wie in Studie 1 im statischen Fahrsimulator des WIVW durchgeführt (siehe Kap. 6.1.1)

7.2.5 Durchführung

Einweisung

Zu Beginn des Experiments wurden die Teilnehmer über das Ziel der Studie, die Bewertung der Wirkung der Fahrstreifenwechselankündigung eines einscherenden Fahrers sowie über den Ablauf der Studie vor Unterzeichnung einer Einverständniserklärung informiert.

Eingewöhnungsfahrt

Anschließend absolvierten die Teilnehmer eine Eingewöhnungsfahrt, um sich mit dem Fahrzeug und der Fahraufgabe, aber auch mit dem ERS vertraut zu machen.

Testfahrt

Die Fahrer wurden angewiesen, einem Vorderfahrzeug im Abstand (THW) von 2 s zu folgen. Dies diente der Vergleichbarkeit der Situationen und wurde durch einen ERS unterstützt. Dieser färbt sich lila, wenn der Abstand eines THW > 2 s überschreitet und gelb, wenn ein THW < 2 s unterschritten wird. Keine Farbe zeigte an, dass der exakte Abstand von 2 s eingehalten wurde. Wenn ein Fahrzeug auf der rechten Spur seinen Fahrstreifenwechsel durch Blinken ankündigte, wurde der Teilnehmer angewiesen, diesen einscheren zu lassen und die Außenwirkung des einscherenden Fahrzeuges zu bewerten.

Nach jedem Szenario wurden die in Tabelle 18 (AV) aufgeführten Einzelfragen dem Teilnehmer während der Fahrt präsentiert und er wurde angewiesen, diese Fragen bezüglich der wahrgenommenen Spurwechselstrategie mündlich zu bewerten.

Abschluss

Nach dem Experiment erhielten die Teilnehmer eine Aufwandsentschädigung von 25 Euro und wurden für ihre Teilnahme bedankt. Die Gesamtdauer der Studie betrug ca. 90 Minuten.

7.2.6 Stichprobe

Insgesamt nahmen 25 Teilnehmerinnen an der Studie teil (14 Frauen). Sie waren zwischen 21 und 73 Jahre alt ($M = 36$ Jahre; $SD = 15.7$ Jahre) und besaßen durchschnittlich 18.6 Jahre lang einen Führerschein ($SD = 14.5$ Jahre). Die durchschnittliche jährliche Fahrleistung betrug 10.700 km ($SD = 115.98$ km). Die Fahrer wurden wie in Studie 1 aus einem Teilnehmerpool des WIVW rekrutiert. Alle Teilnehmer wurden im Vorfeld im Fahrsimulator geschult, um sich mit dem Fahren im Simulator vertraut zu machen und die Reisekrankheit zu reduzieren (Hoffmann & Buld, 2006).

7.3 Ergebnisse

7.3.1 Subjektive Datenbasis

Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha < .05$ angenommen. Bei einer Verletzung der Sphärizität wurde die GG Korrektur eingesetzt. Das partielle η^2 wurde als Maß für die Effektgröße angegeben (Bortz, 2005). Zunächst sollen die Ergebnisse der subjektiven Bewertungen hinsichtlich wahrgenommener Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität erläutert werden und im zweiten Schritt der Zusammenhang mit den Fahrdaten dargestellt werden.

Wahrgenommene Kooperationsbereitschaftsbereitschaft

Tabelle 19 fasst die Auswirkungen auf die wahrgenommene Kooperationsbereitschaftsbereitschaft zusammen. Es zeigten sich zwei signifikante Haupteffekte von Blinkerstart und Verweildauer als auch ein signifikanter Interaktionseffekt dieser unabhängigen Variablen als auch zwischen Blinkerstart und Spurwechseldauer. Abbildung 33 und 34 beschreibt die Ergebnisse auf den einzelnen Stufen der unabhängigen Variablen.

Tabelle 19. Darstellung der Ergebnisse für die AV wahrgenommene Kooperationsbereitschaftsbereitschaft.

Beschreibung der UVs	<i>F</i>	<i>df1</i>	<i>df2</i>	<i>p</i>	η^2
Blinkerstart (m)	6.9	2	48	.002	.224
Verweildauer (s) (GG)	4.3	1.54	36.89	.030	.151
Spurwechseldauer (s)	2.3	2	48	.113	.087
Blinkerstart * Verweildauer	2.9	4	96	.024	.110
Blinkerstart * Spurwechseldauer	2.8	4	96	.032	.103
Verweildauer * Spurwechseldauer (GG)	1.3	2.61	62.72	.294	.050
Blinkerstart * Verweildauer * Spurwechseldauer (GG)	1.7	4.24	101.79	.163	.064

*GG Korrektur bei Verletzung der Sphärizität

Basierend auf Bonferroni korrigierten Post Hoc Tests gab es bzgl. des Blinkersignals den Hinweis, dass der Fahrer einen früheren Start des Blinkersignals von 20 m als kooperativer als einen späteren Start von 12 m empfand. Wie in Abbildung 33 dargestellt, wurde dieser Haupteffekt durch die Spurwechseldauer beeinflusst. Die wahrgenommene Kooperationsbereitschaft kann durch die Dauer des Spurwechsels verändert werden. Die Verkehrsteilnehmer interpretierten bei einer späten Blinkersetzung von 12 m Abstand, einen langsamen oder schnelleren Spurwechsel als kooperativer als in der mittleren Bedingung bei 6 s. Bei der Ausprägung von 4 s waren die Fahrer bereits am einscherenden Fahrzeug vorbeigefahren, bei 8 s blieb noch genügend Platz zum Einscheren. Das mittlere Level (6 s) empfanden die Teilnehmer evtl. als zu uneindeutig, um das Fahrzeug einscheren zu lassen. Wenn das einscherende Fahrzeug zu einem späteren Zeitpunkt (20 m) zu blinken begann, betrachteten die Teilnehmer die kürzeste Spurwechselzeit als kooperativ. Bonferroni korrigierte Post-Hoc t-Tests zeigten, dass eine lange Verweildauer als kooperativer empfunden wurde als eine kurze Verweildauer, wenn das Blinken zu spät begonnen hatte (12 m). Aufgrund dieser Interaktion kann der Haupteffekt der Verweildauer nicht interpretiert werden, obwohl er signifikant war.

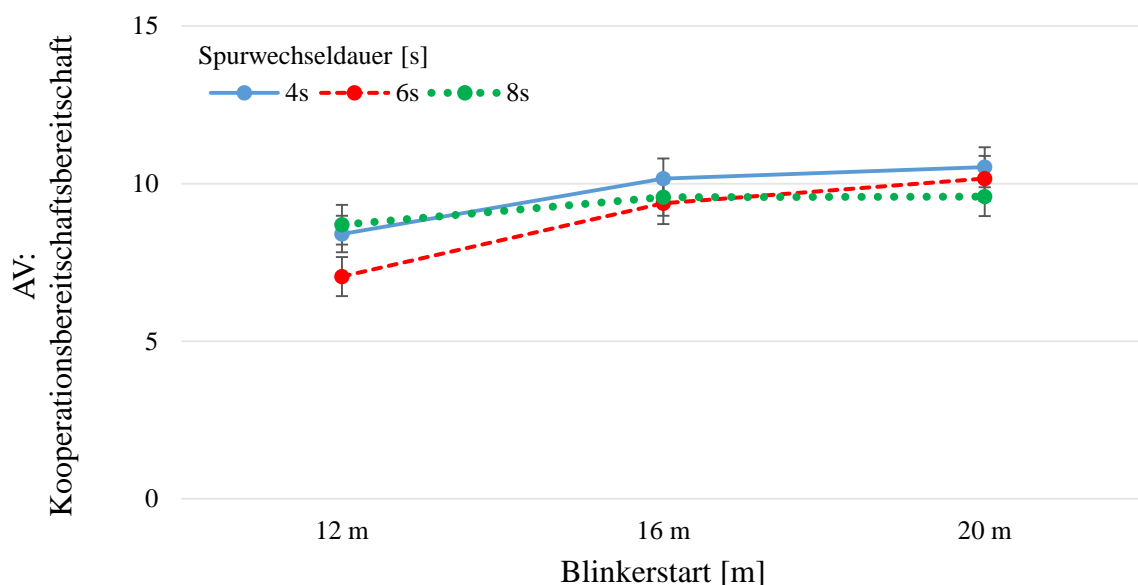


Abbildung 33. Mittelwert und Standardfehler von wahrgenommener Kooperationsbereitschaft bezogen auf die Ausprägungen der UV Blinkerstart und Spurwechseldauer.

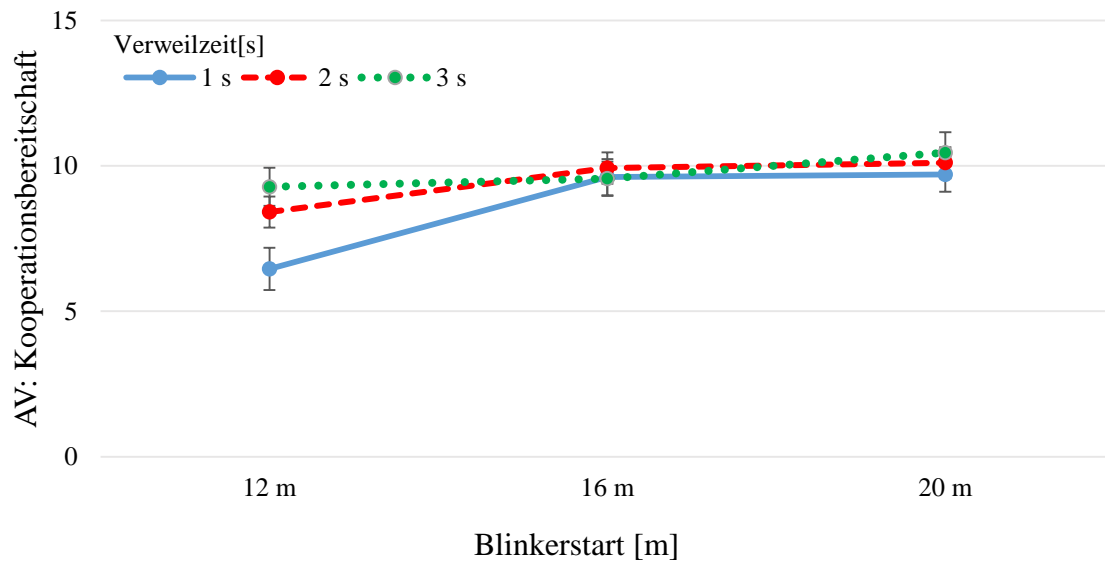


Abbildung 34. Mittelwert und Standardfehler von wahrgenommener Kooperationsbereitschaft bezogen auf die Ausprägungen der UV Blinkerstart und Verweildauer.

Wahrgenommene Eindeutigkeit

Hinsichtlich der Eindeutigkeit wurden ein signifikanter Haupteffekt des Blinkerstarts und ein signifikanter Interaktionseffekt des Blinkerstarts und der Spurwechseldauer festgestellt (siehe Tabelle 20).

Tabelle 20. Darstellung der Ergebnisse für die AV wahrgenommene Eindeutigkeit.

Beschreibung der UVs	<i>F</i>	<i>df1</i>	<i>df2</i>	<i>p</i>	η^2
Blinkerstart (m)	7.9	2	48	.001	.249
Verweildauer (s)	2.3	2	48	.114	.087
Spurwechseldauer (s)	.7	2	48	.521	.027
Blinkerstart * Verweildauer (GG)	1.2	3.03	72.73	.334	.046
Blinkerstart * Spurwechseldauer (GG)	5.2	2.81	67.48	.003	.177
Verweildauer * Spurwechseldauer	2.2	4	96	.069	.086
Blinkerstart * Verweildauer * Spurwechseldauer	.6	8	192	.735	.026

*GG Korrektur bei Verletzung der Sphärizität

Wie Abbildung 35 zeigt, wurde die Signalisierung des Spurwechsels bei 16 m oder 20 m am eindeutigsten wahrgenommen, verglichen mit dem 12 m Abstand. Im Hinblick auf den Interaktionseffekt wurde bei frühzeitigem Blinken (20 m) eine schnellere im Vergleich zu einer langsamen Spurwechseldauer als eindeutiger wahrgenommen. Bei einer späten Blinkersetzung (12 m) wurde der einscherende Fahrer als eindeutiger angesehen, je langsamer er die Spur wechselte.

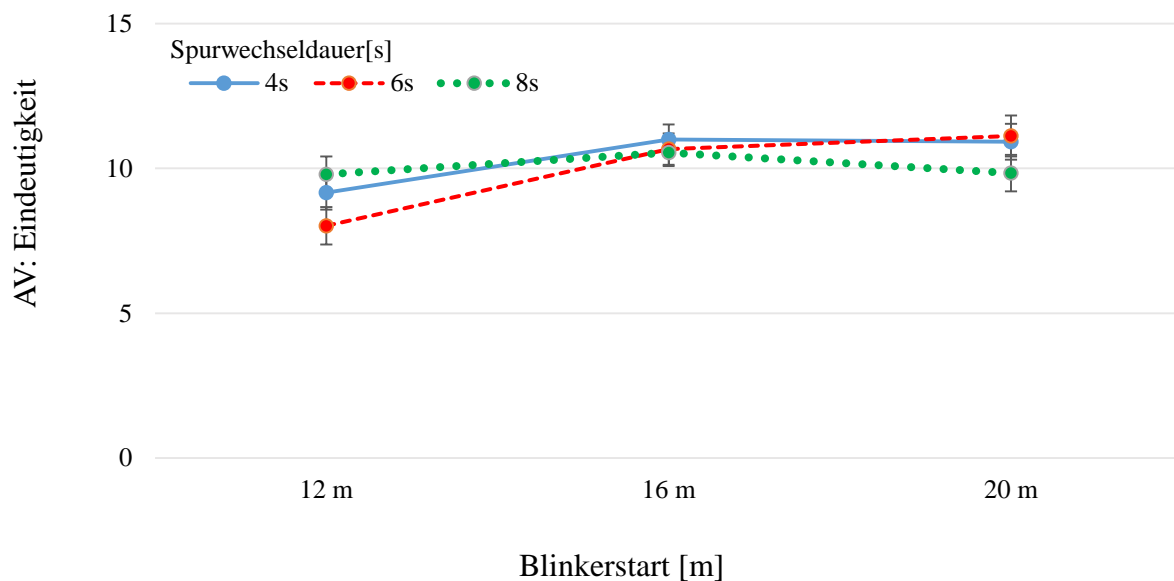


Abbildung 35. Mittelwert und Standardfehler von wahrgenommener Eindeutigkeit bezogen auf die Ausprägungen der UV Blinkerstart und Spurwechseldauer.

Wahrgenommene Kritikalität

Für die wahrgenommene Kritikalität gab es einen signifikanten Haupteffekt des Blinkerstarts (siehe Tabelle 21). Keine der anderen Haupteffekte oder Interaktionen wurden signifikant.

Tabelle 21. Darstellung der Ergebnisse für die AV Wahrgenommene Kritikalität.

Beschreibung der UVs	<i>F</i>	<i>df1</i>	<i>df2</i>	<i>p</i>	η^2
Blinkerstart (m)	6.7	2	48	.003	.218
Verweildauer (s) (GG)	1.8	1.54	36.93	.186	.070
Spurwechseldauer (s) (GG)	0.6	1.66	40.01	.504	.026
Blinkerstart * Verweildauer (GG)	0.6	2.75	65.97	.623	.023
Blinkerstart * Spurwechseldauer (GG)	0.5	3.12	74.88	.655	.023
Verweildauer * Spurwechseldauer	1.3	4	96	.271	.052
Blinkerstart * Verweildauer * Spurwechseldauer (GG)	0.6	4.27	102.51	.628	.027

*GG Korrektur bei Verletzung der Sphärizität

Wie Abbildung 36 zeigt, wird ein einscherendes Fahrzeug umso kritischer wahrgenommen, je später es blinkt. Die Werte lagen aber immer noch in der Kategorie "harmlos".

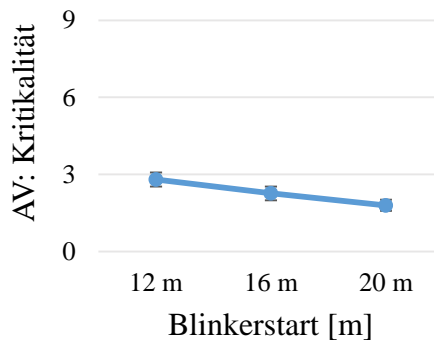


Abbildung 36. Mittelwert und Standardfehler von wahrgenommener Kritikalität bezogen auf den Blinkerstart.

7.3.2 Fahrdaten

Zusammenhang zwischen subjektiver Datenbasis und Fahrdaten

Die Ergebnisse der subjektiven Bewertungen zeigten u.a. auf, dass ein früherer Blinkerstart (20 m) als kooperativer und harmloser wahrgenommen wurde. Die Probanden bewerteten das einscherende Fahrzeug in Abhängigkeit zu der Spurwechseldauer als auch Verweilzeit auf der eigenen Fahrbahn unterschiedlich. Als Nebenfragestellung wurde untersucht, wie es sich im Fahrverhalten äußerte, wenn die Probanden explizit angewiesen wurden, sich kooperativ dem einscherenden Fahrer gegenüber zu verhalten. Basierend auf der Theorie von Reziprozität wurde die Hypothese aufgestellt, dass, wenn die Fahrer eine als kooperativ empfundene Spurwechselankündigung wahrgenommen hatten, sie eher bereit sind, sich dem anderen Fahrer kooperativ gegenüber zu verhalten. Dies kann sich in einer schnelleren Reaktionszeit als auch einer stärkeren Verzögerung widerspiegeln. Somit werden folgende Parameter in Tabelle 22 einer näheren Betrachtung unterzogen.

Tabelle 22. Relevante Kennwerte des Fahrstreifenwechsels in der zweiten Studie.

Kennwerte Einscherer	Einheit
Verzögerung	[m/s ²]
Umfang der Geschwindigkeitsreduktion	[m/s]
Reaktionszeit	[s]

Betrachtung des Parameters Verzögerung

Zur Auswertung des Verzögerungsverhaltens wurde die maximale Verzögerung nach der Blinkersetzung des Einscherers gewählt (siehe Abbildung 37). Daraus ergab sich im Schnitt ein Mittelwert von 3.6 m/s² ($SD = 1.6$ m/s²; Min = 2.6 m/s²; Max = 5.3 m/s²).

Es wurde basierend auf der Literatur von folgenden Hypothesen ausgegangen.

H1: Je kooperativer der einscherende Fahrer wahrgenommen wird, desto mehr wird verzögert.

H2: Je kritischer der einscherende Fahrer wahrgenommen wird, desto weniger wird verzögert

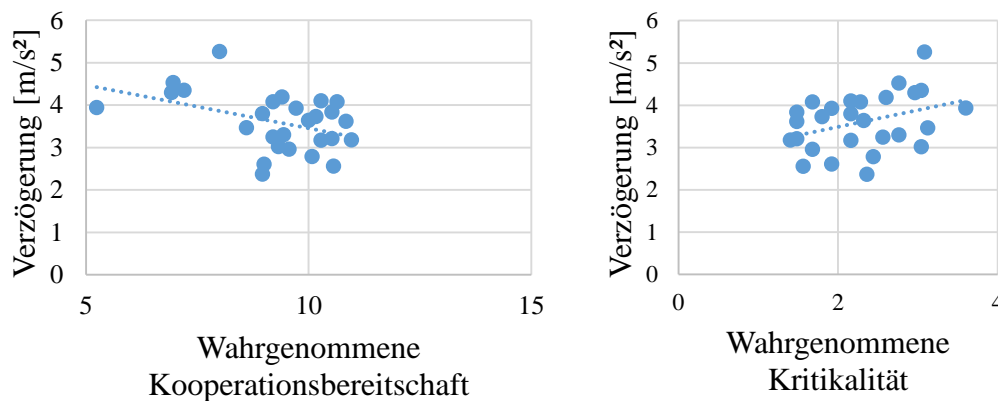


Abbildung 37. Zusammenhang zwischen Wahrgenommener Kooperationsbereitschaft und Verzögerung und zwischen wahrgenommener Kritikalität und Kritikalität.

Um die Zusammenhänge zwischen den subjektiven Daten und den Fahrdaten zu bewerten, wurden Korrelationen nach Pearson berechnet. Hinsichtlich wahrgenommener Kooperationsbereitschaft und Verzögerung konnte ein moderater Zusammenhang festgestellt werden ($r = - .420$, $p = .015$, $N = 25$). Dies galt auch für den Zusammenhang zwischen Kritikalität und Verzögerung ($r = - .362$, $p = .032$, $N = 25$). Es zeigte sich zwar ein signifikanter Zusammenhang allerdings zeigten die Probanden keine stärkere Verzögerung, wenn Sie den anderen Fahrer als kooperativer wahrnahmen, sondern verzögerten stärker, bei zunehmender Kritikalität.

Betrachtung des Parameters Umfang der Geschwindigkeitsreduktion

Um zu analysieren wieviel Geschwindigkeit in den einzelnen Situationen abgebaut wurde, wurde der maximale Umfang der Geschwindigkeitsreduktion nach der Blinkersetzung des einscherenden Fahrzeuges gewählt (siehe Abbildung 38). Daraus ergab sich im Schnitt ein Mittelwert von 4.3 m/s ($SD = 1.6$ m/s; Min = 2.3 m/s; Max = 6.1 m/s).

H1: Je kooperativer der einscherende Fahrer wahrgenommen wird, desto weniger Geschwindigkeit wird abgebaut.

H2: Je kritischer der einscherende Fahrer wahrgenommen wird, desto weniger Geschwindigkeit wird abgebaut.

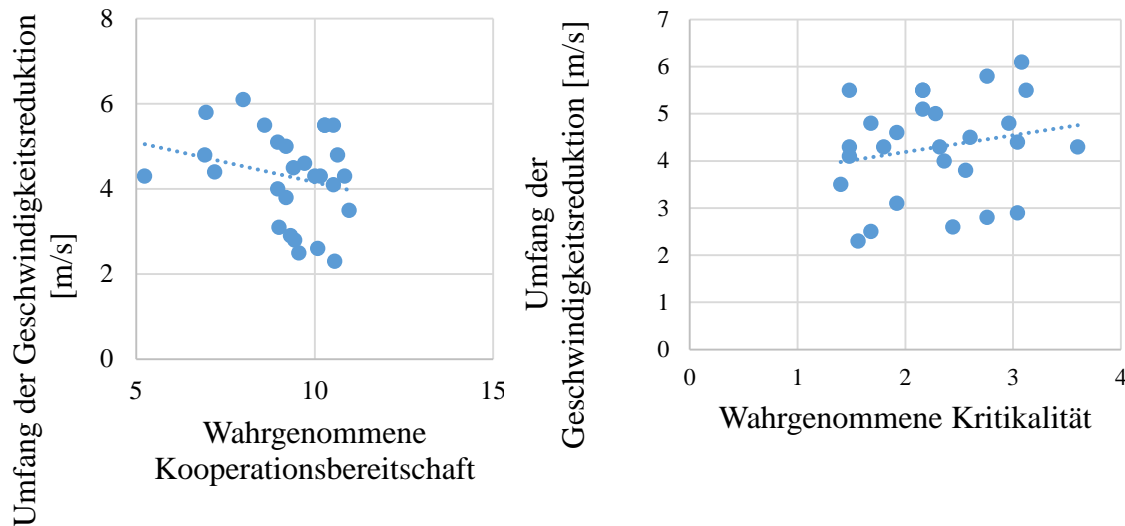


Abbildung 38. Zusammenhang zwischen Wahrgenommener Kooperationsbereitschaft und Umfang der Geschwindigkeitsreduktion und zwischen wahrgenommener Kritikalität und Kritikalität.

Die Berechnung der Zusammenhänge durch Korrelationen nach Pearson ergaben hinsichtlich wahrgenommener Kooperationsbereitschaft und Umfang der Geschwindigkeitsreduktion keinen Zusammenhang ($r = -.244$, $p = .110$, $N = 25$). Dies galt auch für den Zusammenhang zwischen Kritikalität und Umfang der Geschwindigkeitsreduktion ($r = .204$, $p = .154$, $n = 25$). Dies bedeutet, dass die Nullhypothesen angenommen werden müssen, was bedeutet, dass wenn das einscherende Fahrzeug als kooperativ betrachtet wurde, es nicht zu einem erhöhten Geschwindigkeitsabbau gekommen ist, sondern nur dann wenn die Situation als kritisch betrachtet wurde.

Betrachtung des Parameters Reaktionszeit

Die Reaktionszeit des Folgefahrers wurde als Zeitspanne zwischen der Blinkersetzung des einscherenden Fahrers und dem Zeitpunkt, in dem der Folgefahrer das Bremspedal betätigte, definiert (siehe auch Abbildung 39). Es zeigte sich eine durchschnittliche Reaktionszeit von 1.5 s ($SD = 0.8$ s; Min = 1.2 s; Max = 2.1 s). Die durchschnittliche menschliche Reaktionszeit liegt bei 0.7 s (Green, 2000). Der Unterschied kann dadurch zustande gekommen sein, dass die Definitionen von Reaktionszeit unterschiedlich sind (siehe Kap. 2.4.5), in Abhängigkeit davon, welche Werte für die Messung zur Verfügung stehen.

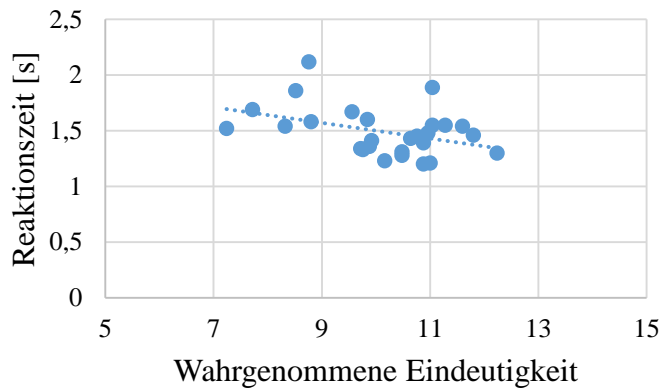


Abbildung 39. Zusammenhang Reaktionszeit und zwischen wahrgenommener Eindeutigkeit.

Es wurde folgende Hypothese aufgestellt, um die Ergebnisse der Studie zu unterstützen.

H1: Je eindeutiger der Fahrer wahrgenommen wird, desto schneller wird auf ihn reagiert.

Um den Zusammenhang zu berechnen wurden Korrelationen nach Pearson berechnet. Hinsichtlich wahrgenommener Eindeutigkeit und Reaktionszeit konnte ein moderater Zusammenhang festgestellt werden ($r = -.400$, $p = .019$, $N = 25$). Dies bedeutet, dass je eindeutiger die Situation war desto schneller wurde reagiert.

Weiterführende Studie

Die Ergebnisse der Hauptstudie zeigten u.a., dass eine verzögerte Blinkersetzung als weniger kooperativ angesehen wurde als eine frühere Blinkersetzung (20 m). Fastenmeier et al. (2001) beschreibt in den einzelnen Phasen des Spurwechsels, dass Menschen ggf. longitudinal beschleunigen, wenn sie auf eine schnellere Spur wechseln möchten. Aus der Literatur ist bekannt, dass geringere Differenzgeschwindigkeiten als positiv wahrgenommen werden (Ehmanns, 2003). Es ist durchaus möglich, dass der Einscherer unter diesen Umständen noch als kooperativ interpretiert werden kann, wenn es die späte Signalisierung durch eine frühere Beschleunigung ausgleicht, was die Notwendigkeit des Abbremsens des Fahrers auf der Zielspur verringern würde. Die weiterführende Studie konzentrierte sich daher auf folgende Forschungsfrage und Hypothesen:

Forschungsfrage

Hat der Beginn der Längsbeschleunigung des einscherenden Fahrzeuges einen positiven Einfluss auf die Außenwahrnehmung des Fahrzeuges durch den Fahrgänger bei einem späten Blinkerstart (12 m)?

Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft

H1: Es gibt einen positiven Zusammenhang zwischen dem Beginn der Längsbeschleunigung und wahrgenommener Kooperationsbereitschaft

Wahrgenommene Eindeutigkeit

H1: Es gibt einen positiven Zusammenhang zwischen dem Beginn der Längsbeschleunigung und wahrgenommener Eindeutigkeit

Wahrgenommene Kritikalität

Es gibt einen negativen Zusammenhang zwischen dem Beginn der Längsbeschleunigung und wahrgenommener Kritikalität

7.4 Untersuchungsmethodik

7.4.1 Versuchsdesign

Unabhängige Variablen

In dieser Studie war das Szenario identisch mit dem der Hauptstudie (Kap. 7.2). Der Blinkerstart wurde jedoch auf 12 m festgelegt d.h. die simulierten Fahrzeuge begannen immer dann zu blinken, wenn die Teilnehmer 12 m von ihnen entfernt waren. Die erste UV war die Verweildauer mit den gleichen drei Ausprägungen wie im ersten Teil (1 s, 2 s, 3 s). Dieser Faktor wurde mit dem neuen Faktor Start Längsbeschleunigung kombiniert. Diese wurden basierend auf Vortests entsprechend ausgelegt und auf 60 % bzw. 80 % der Verweildauer ausgelegt. Die Dauer des Spurwechsels wurde wie im ersten Teil mit 4 s, 6 s und 8 s variiert. Eine Übersicht ist in Tabelle 23 dargestellt. Insgesamt gab es 18 Szenarien, die in randomisierter Reihenfolge in einem Within Design präsentiert wurden. Es wurden die gleichen AV wie in der Hauptstudie gemessen.

Tabelle 23. Darstellung der UVs.

Unabhängige Variablen	Ausprägung	Einheit	Definition
Start longitudinale Beschleunigung	60, 80	[%]	Prozentualer Anteil der Verweildauer, bis das Fahrzeug anfängt zu beschleunigen.
Verweildauer	1, 2, 3	[s]	Zeitspanne von der Blinkersetzung bis zur Durchführung des Fahrstreifenwechsels
Spurwechseldauer	4,6,8	[s]	Zeitspanne, wenn sich der Schwerpunkt des Fahrzeuges von der eigenen Fahrspur über die Fahrbahnmarkierung auf die Zielfahrspur verlagert.

Die Stichprobe, Fahrsimulator, Fahrszenario und Durchführung entsprachen denen aus der Hauptstudie.

7.5 Ergebnisse subjektive Datenbasis

Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha < .05$ angenommen. Bei einer Verletzung der Sphärizität wurde die GG Korrektur eingesetzt. Das partielle η^2 wurde als Maß für die Effektgröße angegeben (Bortz, 2005). Die Ergebnisse der subjektiven Bewertungen werden im Folgenden hinsichtlich wahrgenommener Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität erläutert.

Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft

Zur Untersuchung des Einflusses auf die AV wurde eine 3x3x2 ANOVA mit Messwiederholung verwendet. In Bezug auf die wahrgenommene Kooperationsbereitschaft wurden zwei signifikante Haupteffekte, Start Längsbeschleunigung und Spurwechseldauer, gefunden. Keine der Interaktionen war signifikant (siehe Tabelle 24).

Tabelle 24. Darstellung der Ergebnisse für die AV wahrgenommene Kooperationsbereitschaftsbereitschaft.

Darstellung der UVs	<i>F</i>	<i>df1</i>	<i>df2</i>	<i>p</i>	η^2
Verweildauer (s)	0.49	2	48	.613	.020
Start longitudinale Beschleunigung (%)	12.29	1	24	.002	.339
Spurwechseldauer (s)	7.49	2	48	.001	.238
Verweildauer * Start longitudinale Beschleunigung	0.86	2	48	.428	.035
Start longitudinale Beschleunigung * Spurwechseldauer	0.13	2	48	.882	.005
Verweildauer * Spurwechseldauer (GG)	1.50	2.72	65.29	.225	.059
Verweildauer * Start longitudinale Beschleunigung * Spurwechseldauer (GG)	0.18	2.46	59.01	.879	.007

*GG Korrektur bei Verletzung der Sphärizität

Wie Abbildung 40 zeigt, wurde ein früherer Start der Längsbeschleunigung als kooperativer als ein verzögerter Start angesehen. Dieses Ergebnis entsprach der Annahme, dass die Wahrnehmung eines späten Beginns des Blinksignals durch eine frühe Längsbeschleunigung ausgeglichen werden kann. Hinsichtlich der Spurwechseldauer wurden 8 s und 4 s kooperativer als 6 s wahrgenommen. Dieses Ergebnis spiegelte die Ergebnisse der ersten Studie wider.

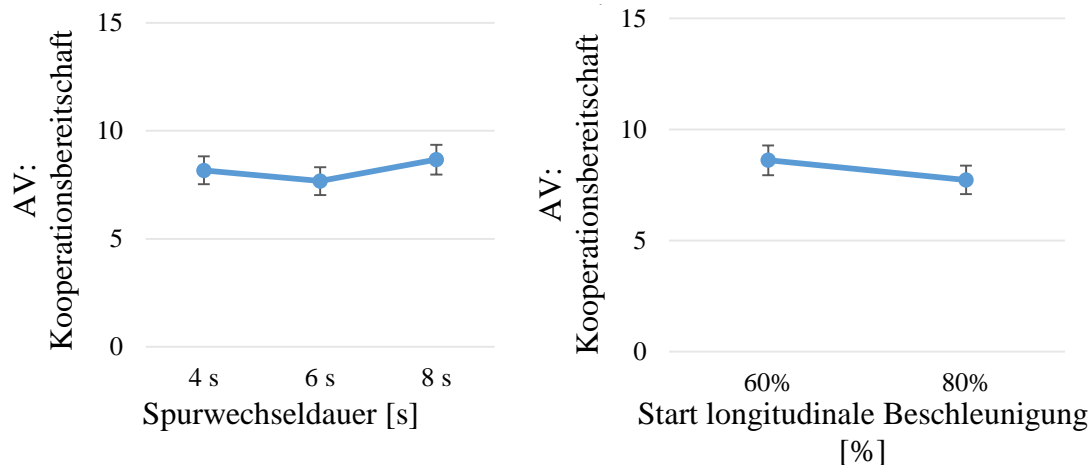


Abbildung 40. Mittelwert und Standardfehler von wahrgenommener Kooperationsbereitschaft bezogen auf die UVs Spurwechseldauer und Start longitudinale Beschleunigung.

Wahrgenommene Kritikalität und Eindeutigkeit

Wie aus Tabelle 25 ersichtlich, zeigte sich kein signifikanter Einfluss auf die wahrgenommene Eindeutigkeit. Das Ergebnis weist darauf hin, dass die longitudinale Beschleunigung keinen signifikanten Mehrwert in Bezug auf die Eindeutigkeit der Situation generiert.

Hinsichtlich der Kritikalität wurde nur ein signifikanter Effekt hinsichtlich des Startes der longitudinalen Beschleunigung beobachtet.

Tabelle 25. Darstellung der Ergebnisse für die AV wahrgenommene Eindeutigkeit und Kritikalität.

Darstellung der UVs	Wahrgenommene Eindeutigkeit					Wahrgenommene Kritikalität				
	<i>F</i>	<i>df1</i>	<i>df2</i>	<i>p</i>	η^2	<i>F</i>	<i>df1</i>	<i>df2</i>	<i>p</i>	η^2
Verweildauer (s)	1.53	2	48	.227	.060	1.70	2	48	.193	.066
Start longitudinale Beschleunigung (%) (GG)	2.17	1	24	.154	.083	6.12	1	24	.021	.203
Spurwechseldauer (s)	2.00	2	48	.146	.077	0.85	2	48	.433	.034
Verweildauer* Start longitudinale Beschleunigung	2.03	2	48	.142	.078	GG 2.61	1.57	37.63	.098	.098
Start longitudinale Beschleunigung * Spurwechseldauer	2.04	2	48	.770	.011	0.91	2	48	.408	.037
Verweildauer * Spurwechseldauer (GG)	0.33	2.68	64.22	.779	.014	GG 0.69	2.64	63.53	.541	.028
Verweildauer * Start longitudinale Beschleunigung * Spurwechseldauer	0.76	4	96	.526	.031	1.41	4	96	.244	.055

*GG Korrektur bei Verletzung der Sphärizität

Eine spätere longitudinale Beschleunigung von 80 % führte zu deutlich höheren Werten der wahrgenommenen Kritikalität als eine frühere Beschleunigung 60 %, was die Bedeutung dieses Spurwechselfaktors für die Verkehrssicherheit unterstreicht. Dennoch ist, wie in Teil 1

hervorgehoben, zu betonen, dass trotz der signifikanten Unterschiede beide Werte in der entsprechenden Skala als "*harmlos*" eingestuft werden.

7.6 Gesamtdiskussion

Um potentielle Vorteile des autonomen Fahrens zu nutzen, ist es notwendig, die anstehenden Herausforderungen von Kommunikation in Mischverkehrsszenarien zu meistern. Die Grundlage dieser Studien ist es, dass die Intention von automatisierten Fahrzeugen vom umgebenden Verkehr verstanden werden muss und eine positive Außenwirkung durch kooperatives Fahren erzeugt werden soll. Dabei spielt die implizite Kommunikation eine wichtige Rolle bei der Gewährleistung der Verkehrssicherheit. Als erster Ansatz muss das menschliche Kommunikationsverhalten analysiert werden, um Entscheidungsregeln für autonome Fahrzeuge abzuleiten. Ziel der vorgestellten Studien war es ein Verständnis zu generieren, wie das Verhalten von Fahrern durch andere Fahrer interpretiert bzw. verstanden wird, um auf diese Weise zu identifizieren, was kooperatives Verhalten aus der Perspektive des Folgefahrers ausmacht. Als Nebenfragestellung wurde untersucht, wie es sich im Fahrverhalten äußerte, wenn die Probanden explizit angewiesen wurden, sich kooperativ dem einscherenden Fahrer gegenüber zu verhalten.

Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Hauptstudie hat gezeigt, dass das einscherende Fahrzeug als kooperativer, eindeutiger und weniger kritisch angesehen wird, bei frühzeitiger Signalisierung der Spurwechselabsicht (20 m). In der Realität ist es jedoch oft nicht möglich, so früh mit dem Blinken zu beginnen, entweder wegen der Notwendigkeit schneller Entscheidungen zu treffen oder weil ein zu frühes Blinken von anderen Verkehrsteilnehmern missverstanden werden kann. So stellt sich die Frage, ob die Möglichkeit besteht, kooperative Fahrerlebnisse zu schaffen, auch wenn es nur einen kurzen Zeitraum gibt, in dem der Folgefahrer auf den Wunsch des einscherenden Fahrzeuges reagieren kann. Die Studienergebnisse haben gezeigt, dass es bei späterer Anzeige der Spurwechselabsicht (12 m) als kooperativer wahrgenommen wird, die Spur entweder langsam (8 s) oder schnell (4 s) zu wechseln. Eine andere Möglichkeit besteht darin, länger zu warten, bevor mit dem Spurwechsel begonnen wird (3 s). Eine mögliche Erklärung für die Interaktionseffekte kann die Tatsache sein, dass Menschen, die mehr Zeit haben zu entscheiden, ob sie den anderen Fahrer einscheren lassen oder nicht, weniger Reaktanz spüren (Brehm, 1966). Das bedeutet, dass sie sich nicht zu einer Entscheidung gezwungen fühlen. Eine weitere mögliche Erklärung wäre die Frustrations-Aggressions-Hypothese (Dollard et al., 1939), die bezogen auf diese Situation bedeuten würde, dass Menschen bei einer längeren Verweilzeit des

anderen Fahrers sich weniger bedrängt fühlen und somit weniger negative Emotionen entwickeln, was zu einer positiveren Bewertung geführt haben könnte.

Darüber hinaus bestätigt die weiterführende Studie die Ergebnisse der Hauptstudie bezüglich der Spurwechseldauer. Die Studie zeigt, dass eine frühere longitudinale Beschleunigung (60 % der Verweilzeit) als weniger kritisch angesehen wird und zu einem positiven Außenbild beitragen kann.

Die Fahrdaten zeigten auf, dass die Wahrnehmung von kooperativem Verhalten nicht mit einem stärkeren Geschwindigkeitsabbau, jedoch mit einer stärkeren Verzögerung einherging. Dies zeigte sich allerdings auch bei der wahrgenommenen Kritikalität. Dies könnte dadurch zustande gekommen sein, dass die Probanden bei der Wahrnehmung einer kritischen Situation die Befürchtung hatten mit dem einscherenden Fahrzeug zu kollidieren und deswegen stärker abgebremst hatten. Die Wahrnehmung eines eindeutigen Fahrverhaltens ging allerdings einher mit einer schnelleren Reaktionszeit.

Die Ergebnisse der Studien ergänzen die bestehende Literatur in mehrfacher Hinsicht: Die Modellierung des Spurwechselverhaltens im dichten Verkehr erfolgt auf Basis des menschlichen Fahrverhaltens (Ahmed, 1999; Choudhury, Rao, Lee, Ben-Akiva, & Toledo, 2007; Hidas, 2002), ohne dabei den Aspekt der Außenwahrnehmung des Fahrzeugs außer Acht zu lassen. Dies ist jedoch ein wesentlicher Aspekt bei der Modellierung einer Spurwechselstrategie für autonome Fahrzeuge, wenn Sie vom umgebenden Verkehr verstanden und akzeptiert werden sollen (Richtel & Dougherty, 2015). Zudem gibt es kaum aktuelle Literatur bezüglich der Interaktion zwischen menschlichen Fahrern. Die bestehende Literatur beschreibt zwar deskriptiv das subjektive Empfinden der Fahrer in Interaktion miteinander (Ellinghaus, 1986; Risser, 1987), geht aber kaum auf die Parameterebene ein. Drittens bereichern die Ergebnisse die Literatur zum kooperativen Fahren (Bengler et al., 2012; Zimmermann et al., 2015) insofern, als sie im Detail darauf eingehen, was unter kooperativem Fahren auf Parameterebene zu verstehen ist.

An dieser Stelle sind einige Punkte zu nennen, die beachtet werden müssen: Weitere Studien sind insbesondere hinsichtlich der Übertragung der Ergebnisse auf das Fahrverhalten im Realverkehr erforderlich. Dies hat mehrere Gründe: Die Studie weist zwar aufgrund der konstant gehaltenen Umgebung eine hohe interne Validität auf, aber andererseits eine geringe externe Validität. Ein weiterer Punkt ist, dass die relativ kurzen Testzeiten in der simulierten Umgebung die Verallgemeinerung der Ergebnisse einschränken. Das tatsächliche Ausmaß der Verhaltensanpassungseffekte im täglichen Fahrverhalten (z.B. Geschwindigkeitsänderung, Spurweite und Aufmerksamkeit) muss untersucht werden. Zudem wurde die Studie in einer

künstlichen Umgebung, einem statischen Fahrsimulator, durchgeführt. In einer realen Umgebung ist der Fahrer einer Vielzahl von Faktoren ausgesetzt, die zu komplexeren Entscheidungen führen können. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Vergleich der Ergebnisse mit denen in einer realen Verkehrssituation von großer Bedeutung und weitere Forschung in diesem Bereich notwendig ist.

Die Betrachtung weiterer UVs kann zur Verallgemeinerung der Ergebnisse beitragen. Die in dieser Studie untersuchten UVs wurden im Entscheidungsprozess des Fahrers, der die Spur wechseln will, als besonders relevant angesehen (Henning, 2010; Rehder, Muenst, Louis, & Schramm, 2016b). Für die Entwicklung eines Algorithmus für den dichten Verkehr auf der Autobahn müssen jedoch zusätzliche Parameter wie der Abstand zum Vorderfahrzeug berücksichtigt werden (Haar, Kleen, Albrecht, Schmettow, & Verwey, 2016; Marczak, Daamen, & Buisson, 2013). Zukünftige Arbeiten sollten zudem weitere Anwendungsszenarien (Fuest et al., 2018) betrachten.

8 Untersuchung der Außenwirkung des Einscherers in einer Fahrstreifenwechselsituation II

8.1 Einleitung

In der zweiten Studie (Kap. 7) wurde untersucht, wie eine nach außen als kooperativ empfundene Fahrstreifenwechselankündigung modelliert werden müsste. Dabei wurden Parameter entsprechend der Phase der Fahrstreifenwechselankündigung von Fastenmeier et al. (2001) genutzt. Basierend auf der Literatur der Objektivierung (Popescu & Nedevschi, 2012; Mandalia & Salvucci, 2005; McCall, Wipf, Trivedi, & Rao, 2007; Dagli, Breuel, Schittenhelm, & Schanz, 2004) zeigte sich, dass Menschen als weitere Strategie, um einen Fahrstreifenwechselwunsch zu verdeutlichen, einen lateralen Versatz in Richtung Fahrbahnmarkierung machten. Dieser besteht aus zwei Größen: der Dauer der Positionierung und der lateralen Endposition, bevor ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt wird. Dies zeigte sich ebenfalls in einer zuvor durchgeführten Vorstudie. Diese untersuchte die Frage, welche Möglichkeiten es gibt, wenn sich nach Blinkersetzung keine Lücke aufgetan hat bzw. wie dies auf emotionaler Ebene bewertet wurde.

Um diese Frage beantworten, wurde eine Vorstudie mit $N = 22$ Probanden (12 weiblich) mit einem durchschnittlichen Alter von $M = 33.17$ Jahre ($SD = 8.71$ Jahre) durchgeführt. Den Teilnehmern wurden in Form einer qualitativen Befragung folgende Fragen gestellt:

- a. Sie fahren auf der Autobahn, wieder auf der mittleren Spur. Jetzt herrscht stockender Verkehr. Auf allen Spuren fahren die Fahrzeuge mit etwa 30 km/h Sie wollen die nächste Ausfahrt nehmen und müssen hierfür auf die rechte Spur wechseln. Die Ausfahrt befindet sich in etwa 500 Metern vor Ihnen. Die Lücken auf der rechten Spur sind zu klein, als dass Sie einfach herüberziehen könnten. Wie gehen Sie nun vor?
- b. Was empfinden Sie aus der Folgefahrerperspektive bei einem Fahrzeug, das einen Fahrstreifenwechsel ankündigt als kooperativ, was als rücksichtslos?

Die Antworten auf diese Fragen wurden in der Folge dessen kategorisiert und finden sich in Abbildung 41 und Abbildung 42. Die auf dem Fahrverhalten basierenden Strategien entsprechen der Literatur (Dogan et al., 2008; Henning, 2010; Rehder et al., 2016b). Fahrparameter für die Spurwechselvorhersage sind u.a. Querversatz, Beschleunigungsverhalten, Lenkwinkel, TTC etc. (Rehder et al., 2016b; Lee et al., 1999). Aus Abbildung 41 wird ersichtlich, dass die laterale Positionierung eine wichtige Rolle spielt, wenn es um Strategien beim Fahrstreifenwechsel geht. Im Zuge dieser Studie soll der Fokus auf die laterale Position und die Dauer, die für die Ausführung der lateralen Positionierung in der Spur benötigt wird, gelegt werden.

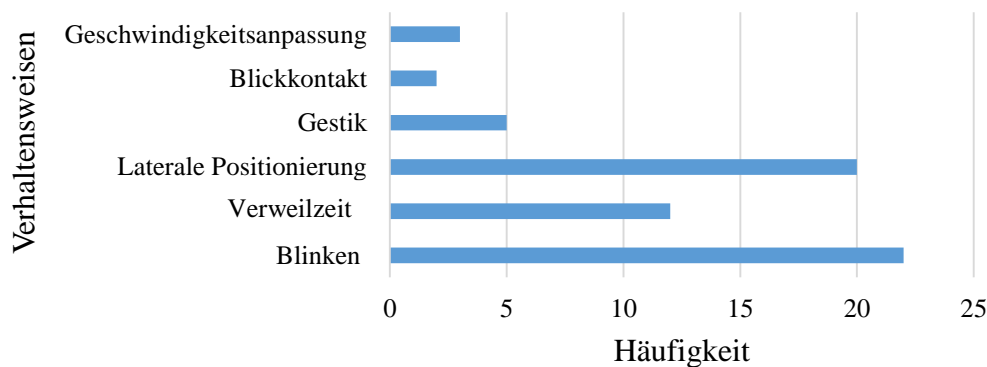


Abbildung 41. Strategien beim Fahrstreifenwechsel.

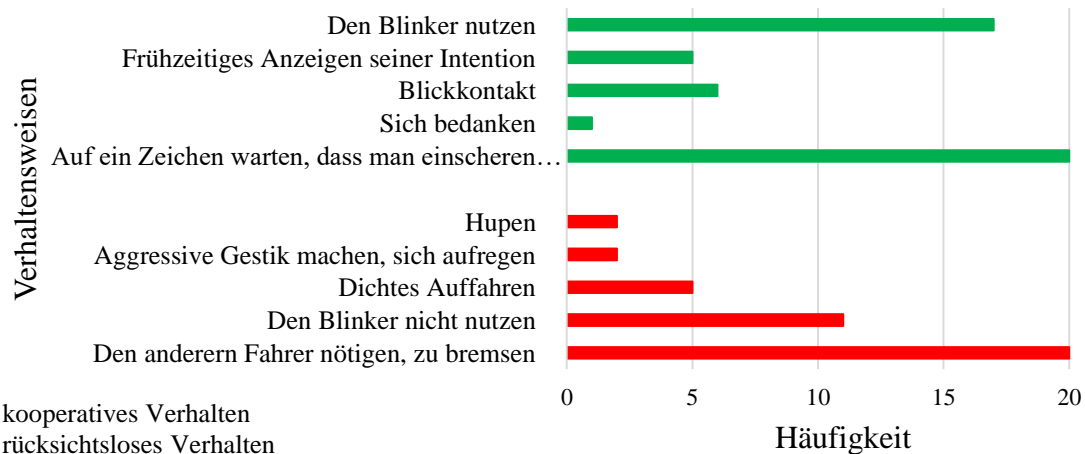


Abbildung 42. Rücksichtsloses und kooperatives Verhalten beim Fahrstreifenwechsel.

Als weitere Größe wurde die Differenzgeschwindigkeit zusätzlich noch explorativ mituntersucht, da es aus der Literatur Anhaltspunkte gab, dass eine geringere Differenzgeschwindigkeit positiv wahrgenommen werden könnte (Baumann et al., 2011; Jula et al., 1999). So fanden Baumann et al. (2011) heraus, dass bei zunehmender Differenzgeschwindigkeit die Probanden, weniger gewillt waren einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Beim Einscheren lassen zeigt sich eindeutiges Fahren durch einen deutlichen Abfall in der Differenzgeschwindigkeit (Ehmanns, 2003).

Die Kapitel sind wie folgt aufgebaut: **Kap. 8.2** erläutert die Forschungsfragen und beschreibt die Untersuchungsmethodik. In **Kap. 8.3** wird auf die Ergebnisse eingegangen und diese werden im Anschluss (**Kap. 8.4**) diskutiert. Diese Studie als Weiterführung der zweiten Studie beschreibt ebenfalls die Forschungsfrage: **Was bedeutet kooperatives Interagieren im Fahrstreifenwechselszenario zwischen menschlichen Verkehrsteilnehmern aus der Folgefahrer Perspektive.**

8.2 Untersuchungsmethodik

8.2.1 Versuchsdesign

Ziel dieser Studie war es zu untersuchen, wie sich Fahrer verhalten, wenn sich nach der Blinkersetzung keine geeignete Lücke aufgetan hat. Daraus ergab sich folgende Forschungsfrage und Hypothesen:

Forschungsfrage

Wie wird der Querversatz, der sich durch die laterale Position und Dauer der lateralen Positionierung definiert, wahrgenommen?

Hypothesen

Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft

H1. Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Dauer der lateralen Positionierung und der wahrgenommenen Kooperationsbereitschaft.

H2. Je näher die Laterale Position relativ zur Fahrbahnmarkierung umso weniger stark wird die Kooperationsbereitschaft wahrgenommen

Wahrgenommene Eindeutigkeit

H1. Es gibt einen Zusammenhang zwischen der lateralen Positionierung und wahrgenommener Eindeutigkeit.

H2. Je näher die Laterale Position relativ zur Fahrbahnmarkierung desto eindeutiger wird die Fahrstreifenwechselabsicht des Einscherers wahrgenommen

Wahrgenommene Kritikalität

H1. Es gibt einen Zusammenhang zwischen der lateralen Positionierung und wahrgenommener Kritikalität.

H2. Je näher die Laterale Position relativ zur Fahrbahnmarkierung und desto kritischer wird die Fahrstreifenwechselabsicht des Einscherers wahrgenommen

Unabhängige Variablen

Die wichtigsten Forschungsfragen betreffen den Einfluss der Dauer der lateralen Positionierung sowie der lateralen Position des Einscherers auf die Wahrnehmung des Folgefahrers. Als Nebenbedingung wurde die Differenzgeschwindigkeit zwischen Folgefahrer und einscherender Fahrer betrachtet. Ausgehend von den oben genannten Vorüberlegungen wird erwartet, dass die unabhängigen Variablen einen Einfluss darauf haben, wie das Fahrzeug auf der Nachbarspur nach Außen wahrgenommen wird. Eine bildliche Darstellung der UV findet sich in Abbildung 43. Die unabhängigen Variablen wurden, wie in Tabelle 26 dargestellt, definiert

Tabelle 26. Definitionen der unabhängigen Variablen.

Unabhängige Variablen	Ausprägung	Einheit	Definition
Laterale Position	0.75, 0.5, 0.25	[m]	Die laterale Position ist der Abstand von Fahrzeugmittellinie zu Fahrspurmittellinie, wobei Null bedeutet, dass das Fahrzeug innerhalb der Fahrspur zentriert ist und positive Werte bedeuten, dass sich das Fahrzeug links von der Mitte des Fahrstreifens befindet (Kauffmann, Winkler & Vollrath, 2018).
Dauer der lateralen Positionierung	1, 2.5 , 4	[s]	Zeitspanne von der Blinkersetzung bis zur Durchführung des Fahrstreifenwechsels.
Differenz-geschwindigkeit	10, 20	[km/h]	Die Differenzgeschwindigkeit ist die Differenz der Längsgeschwindigkeit zweier Fahrzeuge (Abbildung 43 in Bezug auf das EGO und dem E).

Abhängige Variablen

Die abhängigen Variablen i.e. wahrgenommene Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität entsprechen denen aus den vorhergegangenen Studien 1 und 2 in ihrer Darstellung.

In der Studie wurden nach jeder Situation folgende Fragen gestellt:

- Wie kooperativ das Fahrzeug auf der Nebenspur erschien
- Wie eindeutig das Fahrzeug auf der Nebenspur seine Intention angezeigt hat
- Wie kritisch die Situation empfunden wurde

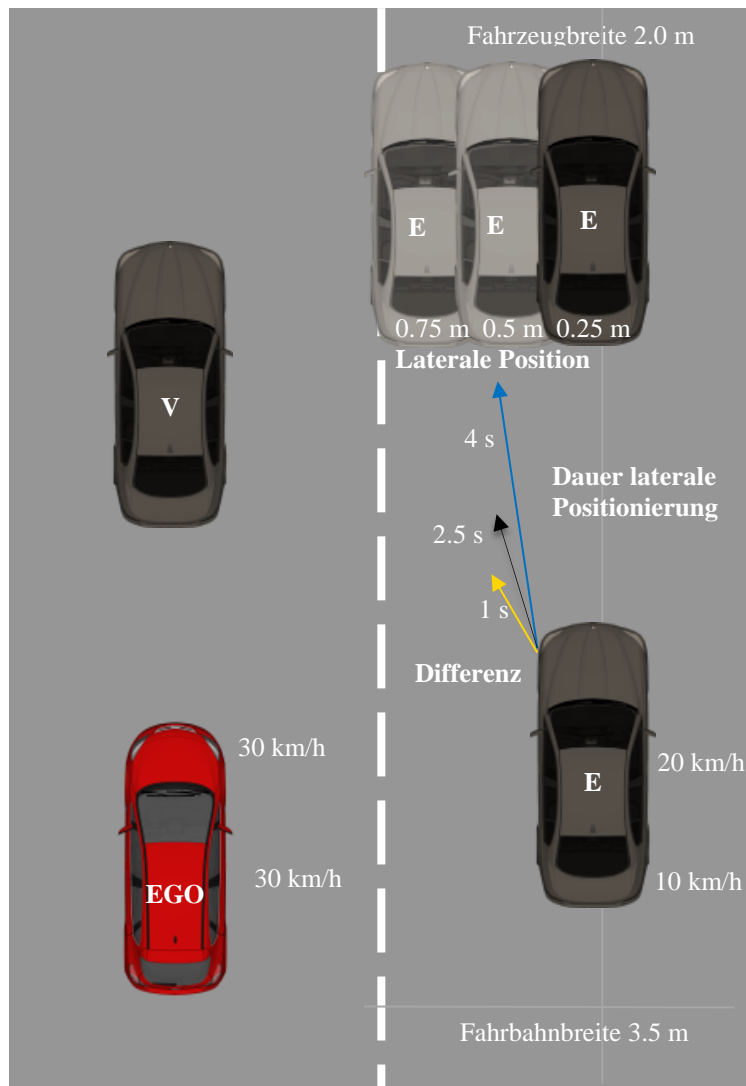


Abbildung 43. Grafische Darstellung der unabhängigen Variablen. Aufgabe des Probanden (EGO) ist es sich zu entscheiden, den Fahrer (E) einscheren zu lassen und dessen Außenwirkung zu beurteilen.

8.2.2 Fahrsimulator

Die Studie wurde in einem statischen Fahrsimulator durchgeführt. Er besteht aus einem Fahrzeugmodell mit Lenkrad, Gas- und Bremspedalen und einem Automatikgetriebe. Zum Einsatz kam die Verkehrssimulationssoftware SPIDER (Strobl, 2003). Das Verhalten der virtuellen Verkehrsteilnehmer wurde mit PELOPS (Christens & Huang, 2008) synchronisiert. Die Projektionswand hatte ein Sichtfeld von 210° mit einem Radius von ca. 2 m. Der Fahrer saß mittig vor der Projektionswand. Hinter dem Mock - Up erzeugten drei Plasmabildschirme die Bilder für die realen Spiegel des Mock - Ups (siehe Abbildung 44).



Abbildung 44. Statischer Fahrsimulator der BMW AG.

8.2.3 Fahrszenario

Das Fahrszenario stellte eine Folgefahrt in einem Stop & Go Verkehr auf einer dreispurigen Autobahn (mit einer Spurbreite von 3.5 m) dar (siehe Abbildung 45). Die durchschnittliche Geschwindigkeit betrug auf der mittleren Spur 30 km/h. Das Testszenario umfasste elf Spurwechselankündigungssituationen (basierend auf den Ausprägungen der unabhängigen Variablen und zwei Kontrollsituationen), in denen ein Fahrer auf der rechten Spur (E) versuchte, auf die schnellere Spur zu wechseln. Er begann die Fahrstreifenwechselankündigung mit der Blinkersetzung. Das Vorderfahrzeug vor dem Teilnehmer (EGO) schloss daraufhin die potentielle Lücke. Im nächsten Schritt machte das einscherender Fahrer eine seitliche Bewegung in Richtung der Zielspur. Die Querbewegung unterschied sich in der Dauer der lateralen Positionierung und der lateralen Position. Als Nebenbedingung wurde zusätzlich die Differenzgeschwindigkeit erfasst. Der Egofahrer fuhr auf der mittleren Spur mit dem konstanten Abstand von zwei Sekunden Zeitvorlauf (THW) hinter dem Vorderfahrer. Der konstante Abstand wurde, wie schon in der zweiten Studie, durch einen ERS gewährleistet, der bei zu großem Abstand ($THW < 2\text{ s}$) lila und bei zu geringem Abstand zum Führungsfahrzeug ($THW < 2\text{ s}$) gelb wurde. In einem bestimmten zeitlichen Abstand kündigte ein Fahrzeug auf der rechten Seite seinen Wunsch an, die Spur zu wechseln. Die Teilnehmer mussten darauf reagieren und entscheiden, ob sie den Fahrer einscheren lassen wollten und das Verhalten des einscherenden Fahrers anhand von Skalen bewerten.

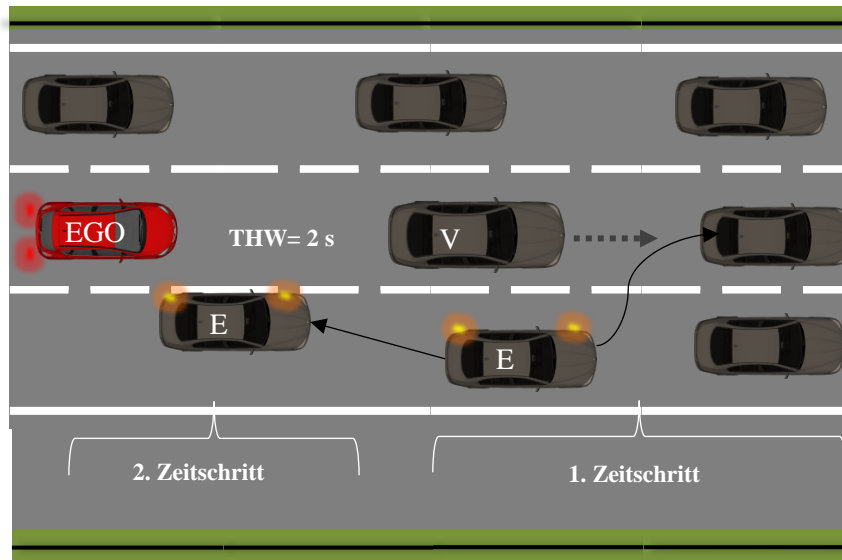


Abbildung 45. Grafische Darstellung des Fahrszenarios. Der Proband (EGO) nimmt wahr, dass das Fahrzeug (E) trotz Blinkersetzung vom Vorderfahrzeug nicht die Lücke gelassen wird und muss sich entscheiden ob er den einscherenden Fahrer einscheren lassen will und dessen Außenwirkung beurteilen.

8.2.4 Durchführung

Die Studie war in vier Teile gegliedert:

1. **Begrüßung und Instruktion** (Dauer bis ca. 15 min): Zu Beginn musste der Teilnehmer eine Einverständniserklärung unterschreiben, in der er über die Studie und die Aufzeichnung der Daten informiert wurde. Anschließend folgte eine standardisierte Instruktion die Einweisung in das Fahrzeug.
2. **Eingewöhnungsfahrt** (Dauer ca. 10 min): Die Teilnehmer haben sich mit dem ERS sowie der Szenerie vertraut gemacht und sind zwei Testsituationen gefahren.
3. **Testfahrt** (Dauer ca. 22 min): Der Fahrer wurde gebeten, dem Vorderfahrzeug zu folgen, bis ein Fahrzeug auf der rechten Fahrspur seinen Wunsch zum Einscheren durch das Setzen des Blinkers ankündigte. Nach jeder Ankündigung musste der Teilnehmer entscheiden, ob er den anderen Fahrer einscheren lassen will und eine Reihe der oben genannten Fragen (siehe abhängige Variablen, Kap. 8.2.1) beantworten. Jedes Fahrszenario dauerte ca. 2 Minuten.
4. **Nachbesprechung (Dauer ca. 5 min).**

Die Gesamtdauer betrug ca. 50 Minuten pro Teilnehmer.

8.2.5 Stichprobe

Insgesamt nahmen $N = 66$ Teilnehmer (30 Frauen) im Alter von 20 bis 70 Jahren ($M = 34.41$ Jahre, $SD = 11.54$ Jahre) an dieser Studie teil. Die Teilnehmer wurden vor Beginn der Studie über eine BMW interne Mailingliste eingeladen. Insgesamt mussten sechs Teilnehmer ausgeschlossen werden: drei wegen Reisekrankheit und zwei weil sie englischsprachige

Teilnehmer aus China waren. Dies inkludierte, dass sie an die Verkehrsbedingungen in asiatischen Ländern gewöhnt waren, was bedeutet, dass eine Bewertung aufgrund von kulturellen Unterschieden nicht möglich war. Dasselbe galt, als die Anweisungen übersetzt werden mussten. Ein Teilnehmer hatte die Anweisungen nicht befolgt. Insgesamt blieben $N = 60$ gültige Teilnehmer für die weitere Datenanalyse übrig. Die Teilnehmer besaßen zwischen 3 bis 44 Jahren Fahrpraxis ($M = 16.9$ Jahre, $SD = 11.3$ Jahre). Insgesamt 15 hatten noch nie an einer Fahrsimulatorstudie teilgenommen. Jeder Teilnehmer besaß einen gültigen Führerschein.

8.3 Ergebnisse

8.3.1 Subjektive Datenbasis

Eine 3x3x2 Mixed ANOVA wurde durchgeführt, um die Auswirkung der Within Faktoren laterale Position (0.25 m, 0.5 m, 0.75 m) und Dauer der lateralen Positionierung (1 s, 2.5 s, 4 s) bezogen auf die wahrgenommene Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität zu untersuchen. Hier wurde ebenfalls gegen ein Signifikanzniveau von $\alpha < .05$ getestet und bei einer Verletzung der Sphärizität eine GG Korrektur durchgeführt, um die Gefahr der α Inflationierung zu verhindern. Als Effektstärke wurde das partielle η^2 gewählt.

Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft

Bezogen auf die wahrgenommene Kooperationsbereitschaft wurde ein signifikanter Effekt des Between Faktors Differenzgeschwindigkeit gefunden ($F(1, 58) = 7.74, p < .05$, partielles $\eta^2 = .12$) als auch eine signifikante Interaktion von Differenzgeschwindigkeit mit Dauer der lateralen Positionierung und laterale Position ($F(4, 232) = 3.93, p < .05$, partielles $\eta^2 = .06$). Aufgrund der kleinen Effektstärke ist die praktische Relevanz des Between Faktors auf die Within Faktoren zu vernachlässigen. Somit sollten diese Faktoren im Folgenden unabhängig von der Differenzgeschwindigkeit betrachtet werden.

Zwei signifikante Haupteffekte und ein Interaktionseffekt wurde gefunden: Die Dauer der lateralen Positionierung mit $F(2, 116) = 23.35, p < .05$, partielles $\eta^2 = .28$ und die laterale Position mit GG $F(1.76, 101.94) = 69.66, p < .05$, partielles $\eta^2 = .55$. Die Haupteffekte für sich konnten nicht interpretiert werden, somit wurde der signifikante Interaktionseffekt einer näheren Betrachtung unterzogen. Die Interaktion zwischen der lateralen Position und der Dauer der lateralen Positionierung wurde mit $F(4, 232) = 42.08, p < .05$, partielles $\eta^2 = .42$ signifikant (siehe Abbildung 46). Dies zeigt, dass die Teilnehmer die laterale Position in Abhängigkeit von der Dauer der Durchführung der lateralen Positionierung betrachteten. Eines der wichtigsten Ergebnisse ist der Einfluss der Dauer der Durchführung der lateralen Positionierung der

Ausprägung 0.75 m der lateralen Position. Während eine schnelle Durchführung der lateralen Positionierung als eher unkooperativ betrachtet wurde ($M = 2.8$), erzeugte die langsame Durchführung eine eher positive Wahrnehmung ($M = 8.9$). Die Situation, die am kooperativsten wahrgenommen wurde, war eine mittlere laterale Position und Durchführung der lateralen Positionierung. Eine Auflistung der Ergebnisse findet sich in Tabelle 27.

Tabelle 27. Darstellung der Ergebnisse für die AV wahrgenommene Kooperationsbereitschaftsbereitschaft.

Darstellung der UVs	<i>F</i>	<i>df1</i>	<i>df2</i>	<i>p</i>	η^2
Dauer laterale Position (s)	23.35	2	116	.000	.287
Laterale Position (m) (GG)	69.66	1.76	101.94	.000	.546
Dauer lateraler Position * Differenzgeschwindigkeit	3.17	2	116	.045	.052
Laterale Position * Differenzgeschwindigkeit	0.13	2	116	.877	.002
Dauer laterale Position * Laterale Position	42.08	4	232	.000	.420
Dauer laterale Position * Laterale Position * Differenzgeschwindigkeit	3.93	4	232	.004	.063

*GG Korrektur bei Verletzung der Sphärizität

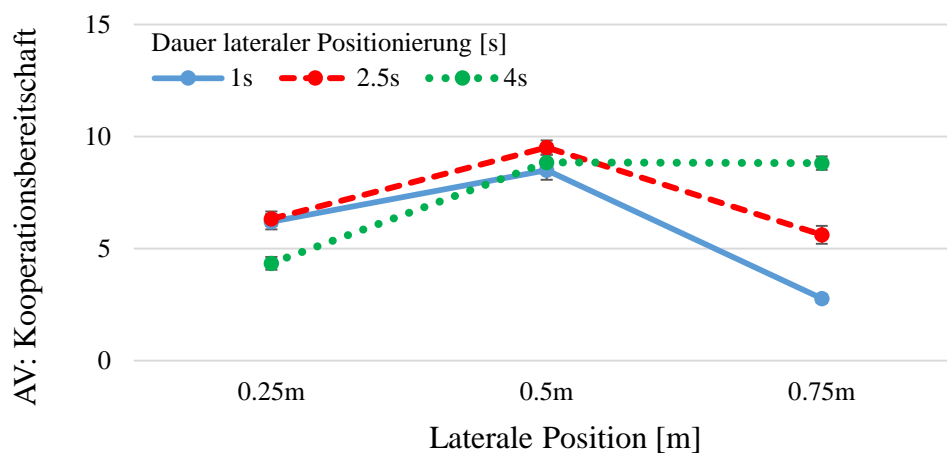


Abbildung 46. Mittelwert und Standardfehler von wahrgenommener Kooperationsbereitschaft bezogen auf die UVs laterale Position und Dauer der lateralen Positionierung.

Wahrgenommene Eindeutigkeit

Bezogen auf die wahrgenommene Eindeutigkeit, wurde ein signifikanter Interaktionseffekt der Differenzgeschwindigkeit mit der Lateralen Position und der Dauer der lateralen Positionierung mit $F(3.46, 200.59) = 3.93$, $p < .05$, partielles $\eta^2 = .04$ gefunden. Ähnlich den Ergebnissen bei wahrgenommener Kooperationsbereitschaft findet sich auch hier eine relativ kleine Effektstärke der Differenzgeschwindigkeit. Diese hat daher keine praktische Relevanz für die laterale Position und der Dauer der lateralen Positionierung. Somit werden diese Faktoren

unabhängig von der Differenzgeschwindigkeit betrachtet. Die ANOVA zeigt hier zwei signifikante Haupteffekte (Dauer der lateralen Positionierung $F(1.81, 116) = 60.66, p < .05$, partielles $\eta^2 = .51$ und laterale Position $F(1.75, 116) = 461.102, p < .05$, partielles $\eta^2 = .89$). Zusätzlich wurde ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen beiden Within Faktoren gefunden ($F(3.46, 232) = 12.69, p < .05$, partielles $\eta^2 = .05$). Der Plot in Abbildung 47 zeigt dabei eine ordinale Interaktion auf, mit der Ausnahme der lateralen Position von 0.75 m zwischen den Stufen 2.5 s und 4 s der lateralen Positionierung. Der Plot weist dennoch weitestgehend auf denselben Trend hin. Somit können die Haupteffekte isoliert voneinander betrachtet werden. Eine kleine laterale Position wird als weniger eindeutig wahrgenommen, je langsamer diese ausgeführt wird. Je größer die laterale Position ist und je schneller diese ausgeführt wird, desto eindeutiger wird die Fahrstreifenwechselintention wahrgenommen. Aufgrund der kleinen Effektstärke werden weitere Analysen bzgl. des Interaktionseffektes nicht durchgeführt. Eine Übersicht bietet Tabelle 28.

Tabelle 28. Darstellung der Ergebnisse für die AV wahrgenommene Eindeutigkeit.

Darstellung der UVs	<i>F</i>	<i>df1</i>	<i>df2</i>	<i>p</i>	<i>η²</i>
Dauer laterale Position (s) (GG)	60.66	1.81	105.04	.000	.511
Laterale Position (m) (GG)	461.10	1.75	101.29	.000	.888
Dauer laterale Position* Differenzgeschwindigkeit	3.26	2	116	.042	.053
Laterale Position* Differenzgeschwindigkeit	.79	2	116	.456	.013
Dauer laterale Position*Laterale Position (GG)	3.10	3.46	200.59	.022	.051
Dauer laterale Position*Laterale Position* Differenzgeschwindigkeit	2.56	4	232	.039	.042

*GG Korrektur bei Verletzung der Sphärizität

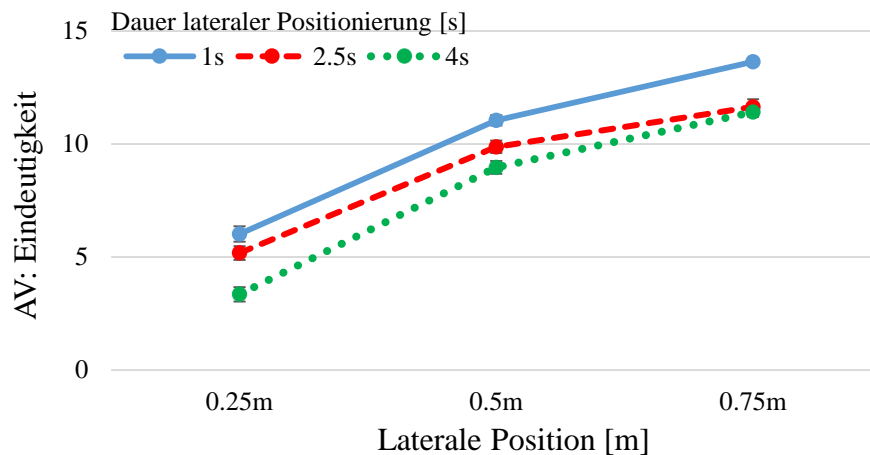


Abbildung 47. Mittelwert und Standardfehler von wahrgenommener Eindeutigkeit bezogen auf die UVs Laterale Position und Dauer der Lateralen Positionierung.

Wahrgenommene Kritikalität

Hinsichtlich der Kritikalität wurde ein signifikanter Interaktionseffekt der Differenzgeschwindigkeit und der Dauer der lateralen Positionierung gefunden ($F(4, 232) = 2.64, p < .05$, partielles $\eta^2 = .04$). Wie bereits erwähnt, sollten die laterale Position und die Dauer der lateralen Positionierung unabhängig von der Differenzgeschwindigkeit aufgrund der geringen Effektstärke der Differenzgeschwindigkeit betrachtet werden.

Die weitere Analyse zeigte zwei signifikante Haupteffekte und einen Interaktionseffekt. (Dauer der lateralen Positionierung: $F(2, 116) = 32.16, p < .05$, partielles $\eta^2 = .36$; laterale Position: $F(2, 116) = 60.317, p < .05$, partielles $\eta^2 = .51$; Dauer der lateralen Positionierung und der laterale Position $F(4, 232) = 19.109, p < .05$, partielles $\eta^2 = .25$). Die Haupteffekte können nicht einzeln interpretiert werden. Der Interaktionseffekt zeigt an, dass die Teilnehmer die laterale Position unterschiedlich wahrgenommen hatten, je nachdem, wie schnell die laterale Positionierung ausgeführt wurde (siehe Abbildung 48; Tabelle 29). Generell wurden die meisten Situationen als „harmlos“ eingestuft. Eine Ausnahme ist der Einfluss der Dauer auf den Versatz von 0.75 m sein. Während eine langsame Dauer als harmlos empfunden wurde, wurde die Situation umso kritischer betrachtet, je schneller die Dauer war. Für weitere Details siehe Tabelle 29.

Tabelle 29. Darstellung der Ergebnisse für die AV wahrgenommene Kritikalität.

Darstellung der UVs	<i>F</i>	<i>df1</i>	<i>df2</i>	<i>p</i>	η^2
Dauer lateraler Position (s)	32.16	2	116	.000	.357
Laterale Position (m)	60.31	2	116	.000	.510
Dauer lateraler Position * Differenzgeschwindigkeit	3.46	2	116	.035	0.56
Laterale Position * Differenzgeschwindigkeit	0.45	2	116	.641	0.08
Dauer laterale Position * Laterale Position	19.09	4	232	.000	0.25
Dauer laterale Position * Laterale Position * Differenzgeschwindigkeit	2.64	4	232	.034	.044

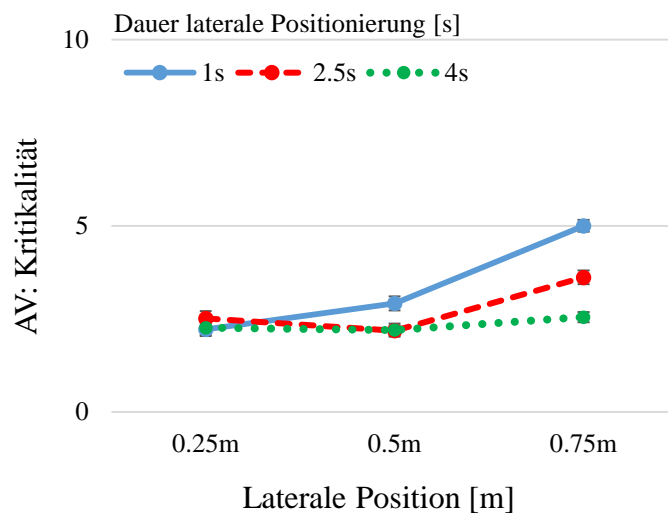


Abbildung 48. Mittelwert und Standardfehler von wahrgenommener Kritikalität bezogen auf die UVs laterale Position und Dauer der lateralen Positionierung.

8.3.2 Fahrdaten

Deskriptive Analyse des Fahrstreifenwechselverhaltens

Um zu überprüfen, ob die Werte der Fahrdaten mit denen aus der Realität vergleichbar sind, wurden die wichtigsten Parameter des Einscherverhaltens aufgezeigt und kurz erläutert (siehe Tabelle 30).

Tabelle 30. Relevante Kennwerte des Fahrstreifenwechsels in der dritten Studie.

Kennwerte Einscherer	Einheit
Umfang der Geschwindigkeitsreduktion	[m/s]
Verzögerung	[s]
Reaktionszeit	[s]

Betrachtung des Parameters Umfang der Geschwindigkeitsreduktion

Der Umfang der Geschwindigkeitsreduktion stellt dar, um wie viel m/s Geschwindigkeit abgebaut wurde. Hierzu wurde der maximale Wert des Umfanges der Geschwindigkeitsreduktion des Folgefahrers nach Blinkersetzung des einscherenden Fahrers genommen. Fälle, in denen eine Vollbremsung gemacht wurde, wurden aus der Analyse ausgeschlossen. Es zeigte sich im Schnitt ein Geschwindigkeitsabbau von 4.8 m/s ($SD = 4.0$, Min = 4.9 m/s; Max = 8.4 m/s).

Betrachtung des Parameters Verzögerung

Hierzu wurde der maximale Wert des Umfanges der Geschwindigkeitsreduktion des Folgefahrers nach Blinkersetzung des einscherenden Fahrers genommen. Es zeigte sich im Schnitt eine Verzögerung von 1.5 m/s² ($SD = 0.3$ m/s²; Min = 1.0 m/s²; Max = 1,5 m/s²). Einen Überblick über die einzelnen Situationen liefert Abbildung 49.

Betrachtung des Parameters Reaktionszeit

Die Reaktionszeit ist der Zeitpunkt nach Durchführung des Querversatzes bis zur Betätigung des Bremspedales. Es zeigte sich im Schnitt eine Reaktionszeit von 0.8 s ($SD = 0.7$ s, Min = 0.6 s; Max = 1.1 s).

Zusammenhang zwischen subjektiver Datenbasis und Fahrdaten

Spurwechseldurchführung

In Abbildung 49 ist eine Übersicht der Häufigkeiten von erfolgten vs. nicht erfolgten Spurwechseln zu sehen. Insgesamt wurden über alle Situationen hinweg 558 Spurwechsel von 675 möglichen Spurwechseln durchgeführt. Interessant sind vor allem Situation 8, 9 und 18, in denen die häufigste Anzahl nicht durchgeführter Spurwechsel vorkommen. Um zu validieren, ob sich die Häufigkeiten nur zufällig in den einzelnen Situationen unterscheiden wurde der Test nach Cochrans Q Test gewählt.

H1: Das Verhältnis von Spurwechsel durchgeführt zu nicht durchgeführt ist über die Situationen hinweg nicht gleich.

Es zeigte sich ein signifikantes Ergebnis d.h. es gibt Situationen, in denen häufig nicht gewechselt und Situationen in denen häufig gewechselt wurde $\chi^2(8) = 50.25, p < .001$.

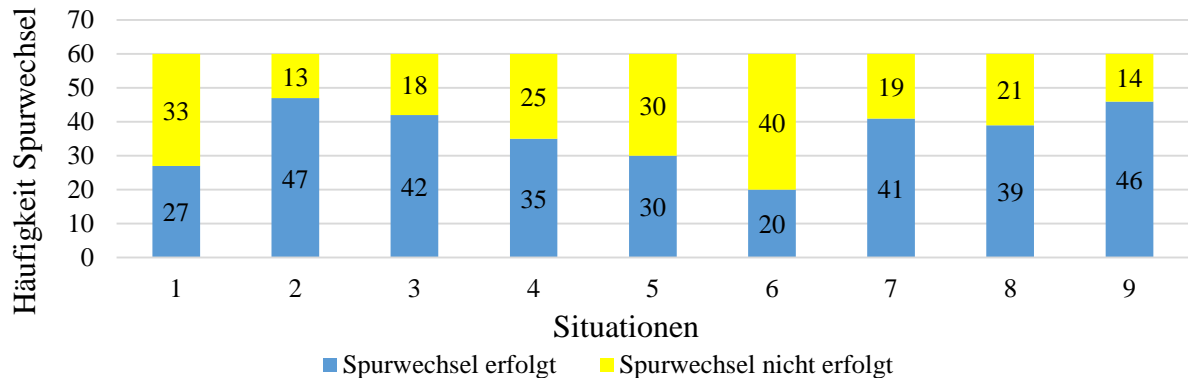


Abbildung 49. Vergleich der Häufigkeiten hinsichtlich Spurwechseldurchführung.

Die Situation 19 (Parameterkombination: 0 s, 7 m/s, 1.5 m/s²) und 20 (Parameterkombination: 1 s, 7 m/s, 1.5 m/s²) stellen Situationen dar, die subjektiv als sehr kooperativ gesehen wurden. Um den Zusammenhang zu untersuchen wurde eine punktbiserale Korrelation zwischen Kooperation und Spurwechseldurchführung berechnet. Es zeigte sich ein moderater Zusammenhang ($r = -.304, p < .001, N = 27$). Je kritischer die Situation wahrgenommen wurde, desto weniger wurde die Spur gewechselt.

8.4 Diskussion

Ziel dieser Studie war es herauszufinden, wie die Fahrstreifenwechselankündigung (Variation der lateralen Position und der Dauer der lateralen Positionierung eines einscherenden Fahrzeuges) von einem Folgefaher auf der Zielspur wahrgenommen wird. Als Nebenbedingung wurde der Einfluss der Differenzgeschwindigkeit auf die Wahrnehmung des Folgefahers untersucht. Hierzu wurde eine Studie im statischen Fahrsimulator durchgeführt, in der die Teilnehmer in einer Folgefahrt in einem Stop & Go Verkehrsszenario auf der Autobahn fuhren. Dabei kündigte in einem bestimmten zeitlichen Abstand ein Fahrzeug seinen Fahrstreifenwechselwunsch durch Blinkersetzung an, wobei die Spurwechselwechselankündigung basierend auf der lateralen Position und der Dauer der lateralen Positionierung variierte. Nach jeder erlebten Situation mussten sich die Teilnehmer entscheiden, ob Sie das Fahrzeug einscheren lassen wollten und wie sie das Fahrzeug hinsichtlich wahrgenommener Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität bewerteten. Die Ergebnisse der Studie können wie folgt zusammengefasst werden.

Der signifikant gewordene Effekt der Differenzgeschwindigkeit als auch der Interaktionseffekt mit den zwei unabhängigen Within Faktoren Dauer der lateralen Positionierung als auch lateraler Position zeigte, dass die Differenzgeschwindigkeit einen Einfluss auf die UVs hatte, auch wenn die Effektstärke relativ klein war. Dies findet sich auch in der Literatur wieder, (Baumann, 2011, Jula et al., 1999), nach der bei zunehmender Differenzgeschwindigkeit, die Situation als zunehmend kritisch beurteilt wurde einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Somit müsste in zukünftigen Untersuchungen dieser Faktor einer genaueren Betrachtung unterzogen werden.

Die Wahrnehmung der Eindeutigkeit wurde verbessert, je größer die laterale Position war und je schneller diese ausgeführt wurde. Das Ergebnis stimmt mit der Literatur im Bereich der Aufmerksamkeit (Wickens et al., 2003) überein.

In Bezug auf die wahrgenommene Zusammenarbeit wurden zwei signifikante Haupteffekte und ein signifikanter Interaktionseffekt festgestellt. Je langsamer sich das Fahrzeug näherte, desto kooperativer wurde es betrachtet. Dieser Effekt stagnierte bei 2.5 s, was bedeutet, dass eine längere Dauer der seitlichen Bewegung nicht als kooperativer angesehen wurde. Eine mögliche Erklärung ist, dass der Fahrer, wenn er mehr Zeit hat zu entscheiden, den anderen Fahrer einscheren zu lassen, weniger Reaktanz empfand (Brehm, 1966), weil er nicht vor vollendete Tatsachen gestellt wurde. Andererseits wurde der Fahrer dieses Fahrzeugs als unerfahren oder unentschlossen wahrgenommen, wenn das Fahrzeug auf der rechten Spur zu lange verweilte. Wenn der einscherende Fahrer zu nahe an die Fahrbahnmarkierung fuhr, wurde er als weniger kooperativ angesehen, weil er gegebenenfalls das Gefühl hatte, keine andere Wahl zu haben, als das Einscheren zu akzeptieren. Betrachtet man den Interaktionseffekt von Dauer der lateralen Positionierung und lateraler Position bezüglich der wahrgenommenen Kooperationsbereitschaft, so fällt auf, dass die kooperativste Situation eine Fahrstreifenwechselankündigung mit einer mittleren lateralen Position war, was mit den oben genannten Gründen übereinstimmt. Mit dieser Fahrstrategie wurde der andere Fahrer als respektvoll und rücksichtsvoll empfunden. Eine laterale Position von 0.75 m wurde als positiv empfunden, wenn sie langsam ausgeführt wurde. Dieses Verhalten wurde von den Teilnehmern als entschlossen, aber dennoch freundlich bezeichnet. Der Fahrer wurde am unkooperativsten bewertet, wenn die Dauer der Bewegung schnell war (1 s) und das Fahrzeug die Fahrbahnmarkierung (0.75 m) berührte. In dieser Situation beschrieben die Teilnehmer den Fahrer als aggressiv, entschlossen, rücksichtslos, bedrohlich und egoistisch. Die schwächste Fahrstreifenwechselankündigung eines Fahrers (0.25 m, 4 s) wurde als unerfahren und unentschlossen bewertet. Diese Ergebnisse stimmten mit der wahrgenommenen Kritikalität

überein. Die Teilnehmer empfanden die Situation als unangenehm, wenn die Spurwechselankündigung schnell und mit einer starken lateralen Position durchgeführt wurde. Hinsichtlich der Fahrdaten wurden die für einen Bremsvorgang relevanten Parameter einer näheren Betrachtung unterzogen, um diese mit denen aus dem Realverkehr abzugleichen. Es zeigte sich, dass sich die Werte hinsichtlich des Umfanges der Geschwindigkeitsreduktion, der Verzögerung in der Literatur wiederfanden (Ammon, 2013; Ahmed, 1999, Ehmanns, 2003). Auch die durchschnittlichen Werte der Reaktionszeit konnte bei Ahmed (1999) und Ehmanns (2003) nachgewiesen werden. Diese fanden Werte zwischen 1.0 s bis 2.0 s.

Einige methodische Fragen der vorliegenden Studie sollen im Folgenden erörtert werden.

Die Skalen der abhängigen Variablen wurden nicht voll ausgenutzt, obwohl dies in den Vorstudien gegeben war. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass die Skala zu fein abgestuft war. Für zukünftige Studien wird daher empfohlen, eine kürzere Version der Skala zu verwenden, z.B. eine fünf-oder siebenstufige Likert - Skala. Laut Dawes (2018) werden dadurch etwas höhere Mittelwerte im Vergleich zu dem höchst möglich erreichbaren Wert erzielt. Außerdem muss darauf hingewiesen werden, dass das potenziell einscherende Fahrzeug immer auf eine Reaktion des Probanden auf der Zielspur gewartet hat, was bedeutet, dass nie eine Kollisionsgefahr bestand und der Fahrer nie einer potenziellen Gefahr ausgesetzt war. Dies könnte dazu beitragen, dass die Kritikalitätsskala nicht voll ausgeschöpft wurde. Zudem wurde die Studie in ein künstliches Umfeld durchgeführt, die den Teilnehmern bekannt war. Dies hätte die Wahrnehmung der Kritikalität beeinflussen können. Eine weitere Einschränkung ist der Versuchsaufbau. Die Studie wurde in einem statischen Fahrsimulator durchgeführt, was ein künstliches Setting darstellt. Für zukünftige Studien wäre zusätzlich eine Studiendurchführung im Realverkehr sinnvoll, um zu untersuchen, ob noch weitere Parameter einen Einfluss auf die Wahrnehmung des Fahrers haben könnten.

Die Studienergebnisse erweitern die bestehende Literatur: Aktuelle Literatur zur Modellierung menschlicher Spurwechselstrategien, sogenannte Gap Acceptance Modelle (vgl. Ahmed, 1999; Choudhury et al., 2007; Ehmanns, 2003; Gipps, 1986b) unterscheiden nur zwischen Courtesy- und Forced Merging Modellen. Dies bedeutet, dass entweder das andere Fahrzeug bereit ist, einen Spurwechsel zuzulassen, oder der Fahrer seinen Wunsch durchsetzen muss. Dabei wird aber die Tatsache vernachlässigt, dass ein Fahrer einen Spurwechselwunsch aktiv ankündigen kann, ohne dabei rücksichtslos oder zu passiv zu wirken. Daher tragen die Ergebnisse der Studie dazu bei, die aktuelle Literatur zum menschlichen Interaktionsverhalten in dichten Verkehrssituationen zu erweitern. Zusätzlich stellen sie einen ersten Ansatz dar, um die

Interaktion zwischen automatisierten Fahrzeugen und menschlichen Fahrern zu modellieren, um als kooperativ und eindeutig verstanden zu werden.

9 Zusammenfassung

Kooperationsbereitschaft beim Fahrstreifenwechsel wurde in der Literatur bis jetzt nur auf qualitativer Ebene (Ellinghaus, 1986; Maag, 2004) betrachtet. Anhand des Standes der Technik wurde dargestellt, dass im Zuge zunehmender Automatisierung und Übernahme der Verantwortung des Fahrzeuges für bestimmte Manöver, die aktuellen Fahrerassistenzsysteme nicht dafür ausgelegt sind, mit menschlichen Fahrern zu interagieren, sondern eher eine passive Rolle einnehmen. Dies kann zukünftig zu Konfliktsituationen führen, da die Systeme nicht entsprechend dem menschlichen Kommunikationsverhalten agieren, noch beachtet wird, welche Botschaft durch ein bestimmtes Fahrverhalten gesendet wird.

Der Fahrstreifenwechsel im Niedriggeschwindigkeitsbereich stellt ein sehr komplexes Manöver dar (Ammoun, Nashashibi, & Laurgeau, 2007), da er nicht nur kognitiv anspruchsvoll ist (Brackstone, McDonald, & Wu, 1998; Ehmanns, 2001), sondern auch erfordert, dass die Interaktionspartner miteinander kooperieren, um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten. Im Zuge dessen wurde in den Studien (Kap. 6, 7 und 8) die menschliche Außenwirkung (wahrgenommene Eindeutigkeit, Kooperationsbereitschaft und Kritikalität) in einer Fahrstreifenwechselsituation aus Einscherer- als auch Folgefahrerperspektive analysiert, um Aussagen für die Auslegung eines Fahrerassistenzsystems (Spurwechselassistent und Abstandsregeltempomat) für diesen Anwendungsfall zu machen. Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

In der ersten Studie wurde der Fahrstreifenwechsel aus Einschererperspektive beleuchtet. Hierbei zeigten die Teilnehmer durch Setzen des Blinkers ihren Spurwechselwunsch an und mussten basierend auf der Reaktion des Folgefahrers sich für oder gegen einen Spurwechsel entscheiden und den Folgefahrer bewerten. Es zeigte sich, dass ein optimales Bremsverhalten charakterisiert war durch die Parameterkombination: 1.5 m/s^2 , 4 m/s und 0 s .

Die zweite und dritte Studie übernahm die Folgefahrerperspektive. In diesen Studien ging es darum, dass ein Folgefahrer die Spurwechselankündigung eines Fahrers, der vor ihm einscheren wollte bewerten musste. Es stellte sich in der zweiten Studie (Kap. 7) heraus, dass eine frühe Blinkersetzung von 20 m als kooperativ betrachtet wurde. Falls dies nicht möglich sein sollte und zu einem späteren Zeitpunkt geblinkt wurde (12 m), zeigte der Einscherer ein optimales Verhalten, wenn er nach der Blinkersetzung länger in der eigenen Fahrspur verweilte (3 s) und dann einen schnellen (4 s) oder einen langsamen (8 s) Fahrstreifenwechsel vollzog oder früher

anfang zu beschleunigen (60%). In einer weiterführenden Studie (Kap. 8) wurde ein Querversatz von 0.5 m am kooperativsten beurteilt. Zusätzlich gab es Hinweise darauf, dass dies auch für eine geringere Differenzgeschwindigkeit (10 m/s) galt.

Das folgende Kapitel soll sich nun der Fragestellung widmen, ob menschliche Fahrer ein kooperatives Verhalten eines automatisierten Fahrzeuges basierend auf menschlichem Verhalten bevorzugen.

10 Evaluation der kooperativen Fahrstrategie mit den herkömmlichen Fahrstrategien

10.1 Einleitung

Ziel der durchgeführten Studien aus **Kapitel 6, 7 und 8** war es, ein tieferes Verständnis für die Interaktion zwischen menschlichen Fahrern in einer Fahrstreifenwechselsituation auf Parameterebene zu bekommen, um darauf basierend Ableitungen für die Interaktion zwischen automatisierten Fahrzeugen und menschlichen Fahrern zu machen.

Es gibt nur wenige Studien, welche die Einstellung und die Hoffnungen der Bevölkerung hinsichtlich der direkten Interaktion mit einem autonomen Fahrzeug untersuchen. Aktuelle Literatur in Bezug auf autonomes Fahren behandelt vor allem den Fahrkomfort, wie ein Insasse von einem autonomen Fahrzeug gefahren werden möchte auf Parameterebene (Ammon, 2013; Bellem, Schönenberg, Krems, & Schrauf, 2016; Festner, Eicher, & Schramm, 2017; Scherer, Schubert, Dettmann, Hartwich, Bullinger, 2016; Scherer et al., 2015). So fand Ammon (2013) beispielsweise heraus, dass die laterale und longitudinale Beschleunigung maßgeblich für Fahrkomfort ist.

In anderen Studien wurde die Thematik eher auf Metaebene betrachtet. Hierzu wurden quantitative oder qualitative Umfragen über die Erwartungen, bzw. Wünsche und Ängste in Bezug auf das autonome Fahren durchgeführt (Casley, Jardim, & Quartulli, 2013; Howard, 2014; Schoettle, 2014).

Studien, die sich direkt mit der Interaktion zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern beschäftigen, beziehen sich auf die Interaktion zwischen Insasse und automatisiertem Fahrzeug (Ammoun, Nashashibi, & Laurgeau, 2007; Li, Wang, & Kim, 2005; Walch et al., 2016) oder die Interaktion zwischen Fußgängern und automatisiertem Fahrzeug (siehe Kap. 2.6). Diese nutzen die Wizard of Oz Methodik (Habibovic et al., 2016), um nähere Erkenntnisse und Einblicke hinsichtlich der Wünsche der Bevölkerung in Bezug auf die Interaktion mit autonomen Fahrzeugen zu bekommen.

Die bestehende Literatur soll somit in diesen Studien um folgende Forschungsfrage angereichert werden:

Wie wird eine, auf menschlichem Fahrverhalten basierende automatisierte kooperative Fahrstrategie (Brems- und Spurwechselstrategie) im Vergleich zu einer herkömmlichen Strategie bewertet?

Diese Fragestellung bezieht sich im Gegensatz zu den in Kap. 6 bis Kap. 8 durchgeführten Studien auf die Beurteilung der Interaktion mit einem automatisierten Fahrzeug.

Nachdem sich in den ersten drei Studien gezeigt hatte, dass die wahrgenommene Kooperation signifikant vom Verhalten abhängt, wurde dies in einen entsprechenden Algorithmus zum einen für ein automatisch fahrendes und einen Spurwechsel durchführendes Fahrzeug als auch für ein automatisch auf einen Einscherer reagierendes Fahrzeug integriert. Im Folgenden wird untersucht, ob ein solches angepasstes Verhalten im Vergleich zu einer herkömmlichen Strategie entsprechend dem aktuellen Stand der Technik als positiver und kooperativer erlebt wird. Hierzu wird in demselben Szenario aus den Studien in **Kap. 6 - Kap. 8** das manuelle Fahrzeug durch ein automatisiertes Fahrzeug ersetzt. Dieses führt zum einen die Fahrstreifenwechsel als auch die Bremsreaktion nach einem Algorithmus durch, welcher auf den Erkenntnissen der bisherigen Studien basiert.

Somit wird in zwei Studien jeweils aus der Folgefahrer- (**Evaluationsstudie Spurwechselstrategie**) und aus der Einschererperspektive (**Evaluationsstudie Bremsstrategie**) zwei neue mit den herkömmlichen Fahrstrategien Folgemodell nach Wiedemann (1974) und TRM aus dem Fahrermodell von PELOPS verglichen und getestet, welche Strategie besser bewertet wird.

Dabei steht diesmal die Interaktion zwischen einem menschlichen Fahrer und einem automatisierten Fahrzeug im Vordergrund.

Evaluationsstudie Spurwechselstrategie

10.2 Untersuchungsmethodik

10.2.1 Versuchsdesign

Ziel dieser Studie war es herauszufinden, ob sinnvolle Ableitungen aus dem als kooperativ empfundenen Fahrverhalten zwischen menschlichen Fahrern auf ein automatisiertes Fahrzeug übertragen werden können. Daraus lassen sich folgende Forschungsfragen und Hypothesen ableiten:

Forschungsfragen

- 1. Welche Fahrstrategie erhält eine bessere Bewertung hinsichtlich der Außenwirkung?**
- 2. Welche Wünsche haben menschliche Fahrer an ein automatisiertes Fahrzeug hinsichtlich seines Fahrverhaltens?**

Hypothesen

Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft

H1: Die neue Spurwechselstrategie wird als kooperativer wahrgenommen als die ursprüngliche Fahrstrategie

Wahrgenommene Eindeutigkeit

H1: Die neue Spurwechselstrategie wird als eindeutiger wahrgenommen als die ursprüngliche Fahrstrategie

Wahrgenommene Kritikalität

H1: Die neue Spurwechselstrategie wird als weniger kritisch wahrgenommen als die ursprüngliche Fahrstrategie

Unabhängige Variablen

Die Probanden erlebten aus Folgefahrerperspektive zwei Spurwechselstrategien hintereinander: Die neu entwickelte Fahrstrategie A und die Fahrstrategie TRM (Christens & Huang, 2008) als auch eine Kontrollsituation.

Die Fahrstrategie A basierte auf den Erkenntnissen der Studie aus Kapitel 7 und 8. Das heißt es wurde frühzeitig geblinkt (20 m) und bei nicht Öffnen der Lücke ein Querversatz gemacht (0.5 m). In der Fahrstrategie TRM wurde geblinkt und nur bei ausreichend großer Lücke ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt. Näheres dazu findet sich im Unterkapitel Beschreibung des Spurwechselmodells TRM in der Verkehrssimulation PELOPS. In der Kontrollsituation blinkte das automatisierte Fahrzeug, das die Spur wechseln wollte und fuhr dann weiter ohne weitere Handlungsschritte hinsichtlich eines Fahrstreifenwechsels durchzuführen. Die Darbietung der Situationen erfolgte randomisiert, um entsprechende Effekte auszuschließen. Dadurch, dass die Probanden alle Fahrstrategien bewerteten, ergab sich ein Versuchsplan mit Messwiederholung.

Abhängige Variablen

Die abhängigen Variablen entsprechen denen aus der zweiten und dritten Studie (Kap. 7 und Kap.8). Die Fragestellung für die einzelnen abhängigen Variablen findet sich in Tabelle 31.

Tabelle 31. Darstellung der AV.

Abhängige Variablen	Frage	Einheit
Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft	<i>Wie kooperativ erschien das automatisierte Fahrzeug?</i>	1 bis 15, Zusatzkategorie 0 (KU-Skala, Heller, 1985)
Wahrgenommene Eindeutigkeit	<i>Wie eindeutig hat das automatisierte Fahrzeug seine Spurwechselintention angezeigt?</i>	1 bis 15, Zusatzkategorie 0 (KU-Skala, Heller, 1985)
Wahrgenommene Kritikalität	<i>Wie kritisch erschien die Situation?</i>	0 - 10, Kritikalitätsskala (Neukum et al., 2008)

10.2.2 Fahrsimulator

Beschreibung des Fahrsimulators

Der Fahrsimulator war mit allen relevanten Bedienelementen eines Fahrzeuges ausgestattet (z.B. Mock Up, Lenkrad, Tacho, Bremspedal mit Forced Feedback, Außen- und Innenspiegel). LCD-Displays fungierten als Außen- und Innenspiegel. Die Umgebungssicht erfolgte über drei DLP-Projektoren, die im Halbkreis, um die Sitzkiste angeordnet waren. Über die drei Kanäle wurde ein frontales und seitliches Sichtfeld entsprechend einem Bildausschnitt von 90° (mit einer Auflösung von jeweils 1400 x 1050 Bildpunkte) dargeboten. Das System bestand aus neun Rechnern (siehe Abbildung 50). Motor-, Wind- und Reifengeräusche wurden mit Hilfe eines digitalen Sound-Systems wiedergegeben. Zum Einsatz kam die Verkehrssimulationssoftware SPIDER (Strobl, 2003). Das Verhalten der virtuellen Verkehrsteilnehmer wurde mit PELOPS (Christens & Huang, 2008) synchronisiert. PELOPS verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz und deckt drei Komponenten ab, die miteinander in Wechselwirkung stehen: ein Umwelt-, Fahrzeug- und Fahrermodell. Durch das Umweltmodell wird es ermöglicht, die Umgebungsbedingungen wie Straßenbeschaffenheit, Anzahl der Spuren, Witterungsbedingungen etc. zu modellieren. Das Fahrzeugmodell berechnet die Bewegungsdynamik in Abhängigkeit von verschiedenen Größen und folgt einem Ursache- und Wirkungsprinzip. Die Verbindung zwischen Fahrzeug und Umweltmodell bildet das Fahrermodell. Dieses gliedert sich in ein Spurwechsel- und ein Folgemodell. Für diese Studie ist das Folgemodell relevant und wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.



Abbildung 50. Sitzkiste der BMW AG.

Beschreibung des Spurwechselmodells TRM in der Verkehrssimulation PELOPS

Wie in Kap. 10.2.1 beschrieben gliedert sich das Fahrermodell von PELOPS in ein Folge- und Spurwechselmodell. Für diese Studie ist das Spurwechselmodell von Relevanz. Das Spurwechselmodell basiert auf Modellen verschiedener Autoren (u.a. Gipps, 1986 und Hidas, 2002). Das Modell gliedert sich in zwei Bereiche: In dem einen wird eine Entscheidung für eine bestimmte Aktion getroffen und in dem zweiten wird eine Aktion ausgeführt. Die Spurwechselintention ist von verschiedenen Faktoren abhängig, u.a. von der individuellen Wunschgeschwindigkeit im Vergleich mit der aktuellen Spurgeschwindigkeit, sich schnell von hinten auf der eigenen Spur nähernde Fahrzeuge oder Überholmanöver. Alle Faktoren münden in einen Wert, der Spurzufriedenheit. Je nachdem ob diese auf der Nachbarspur höher ist als auf der eigenen Spur, entwickelt der Fahrer einen Spurwechselwunsch, der zu einer bestimmten Handlung führt (siehe Abbildung 51). Für die Situation, dass eine Lücke nach Blinkersetzung zu klein sein sollte, würde das Modell in dem Fall nicht die Spur wechseln (siehe Grenzen der Modelle Kap. 3.4.3).

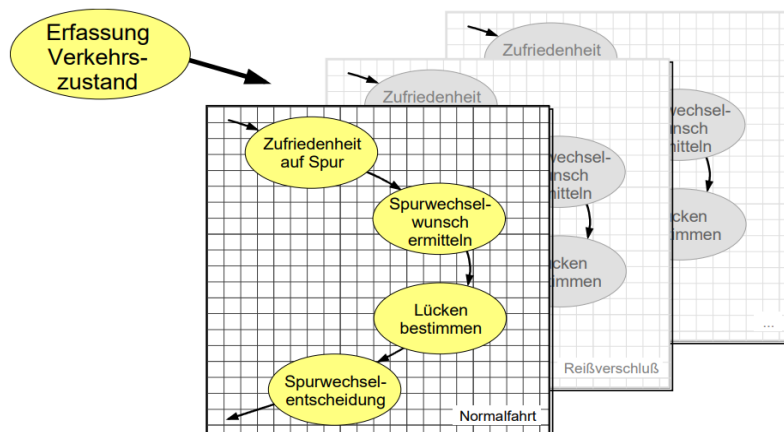


Abbildung 51. Struktur des Spurwechsels (Quelle: Christen & Huang, 2008)

10.2.3 Fahrszenario

Die Versuchsumgebung entsprach der Umgebung aus der zweiten Studie (Kap. 7.2.2). Die Teststrecke stellte eine dreispurige Autobahn mit dichtem Verkehr dar. Der Proband fuhr auf der mittleren Fahrspur mit 30 km/h einem Vorderfahrzeug mit einem selbst gewählten Abstand hinterher. Auf der rechten Spur kündigte in bestimmten Abständen ein automatisiertes Fahrzeug bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h seinen Fahrstreifenwechselwunsch an. Der Proband musste sich entscheiden, ob er das automatisierte Fahrzeug einscheren lassen wollte und dessen Außenwirkung, wie bei den zuvor durchgeführten Studien, auf einer Skala bewerten.

10.2.4 Durchführung

Die Studie dauerte insgesamt 40 Minuten.

1. Einführung (Dauer ca. 15 min): Zunächst erhielten die Teilnehmer Informationen über das Studienziel und den Studienablauf. Zudem mussten sie einen Vorabfragebogen bzgl. ihrer demografischen Angaben und ihrer Einstellung zu automatisierten Fahrzeugen ausfüllen. Im Anschluss wurden sie mit der Sitzkiste vertraut gemacht und wurden gebeten eine Einverständniserklärung zu unterzeichnen.

2. Eingewöhnungsfahrt (Dauer ca. 10 min): Die Eingewöhnungsfahrt diente dazu, die Probanden sowohl mit der Sitzkiste, als auch der Aufgabenstellung vertraut zu machen, um Effekte wie die Simulatorkrankheit zu verhindern. Wenn die Teilnehmer keine Rückfragen mehr hatten und sich im Umgang mit der Sitzkiste und der Simulation sicher fühlten, wurde die eigentliche Testfahrt gestartet.

3. Testfahrt (Dauer ca. 15 min): Die Aufgabe der Probanden war es, dem Vorderfahrzeug auf der mittleren Fahrbahn zu folgen. Auf der rechten Fahrspur tauchte alle zwei Minuten eine Kolonne bestehend aus automatisierten Fahrzeugen auf. Eines davon zeigte seinen Spurwechselwunsch durch Blinkersetzung an. Aufgabe der Teilnehmer war es zu entscheiden, ob sie das automatisierte Fahrzeug einscheren lassen möchten und es bzgl. seiner Außenwirkung zu beurteilen. Nach jeder Entscheidung über einen Spurwechsel wurden die Teilnehmer gebeten, eine subjektive Bewertung ihrer wahrgenommenen Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität abzugeben.

4. Abschlussgespräch

Es erfolgte eine Nachbesprechung der Studie mit anschließender Verabschiedung.

10.2.5 Stichprobe

An der Studie nahmen 29 Fahrer (23 Männer) teil. Die Teilnehmer wurden aus dem internen BMW Pool rekrutiert. Das Durchschnittsalter lag bei 32 Jahren ($SD = 8.00$ Jahre). Die Teilnehmer besaßen den Führerschein im Durchschnitt 14 Jahre ($SD = 8.00$ Jahre) und hatten eine jährliche Fahrleistung von im Mittel 5.000 - 10.000 Kilometern.

10.2.6 Ergebnisse

Die Ergebnisse hinsichtlich der ersten und zweiten Fragestellung werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

10.2.6.1 Inferenzstatistische Ergebnisse

Zur Auswertung der Unterschiede zwischen der ursprünglichen TRM und der neu entwickelten Fahrstrategie A wurde ein t-Test für abhängige Stichproben eingesetzt.

Die Durchführung der t-Tests zeigte sowohl einen signifikanten Unterschied in der wahrgenommenen Kooperationsbereitschaft ($t(29) = -2.77, p < .001, r = .46$) als auch der Eindeutigkeit ($t(29) = -3.27, p < .001, r = .52$) jedoch nicht bei der Kritikalität ($t(29) = 1.27, p = .213, r = .23$) (siehe Abbildung 52).

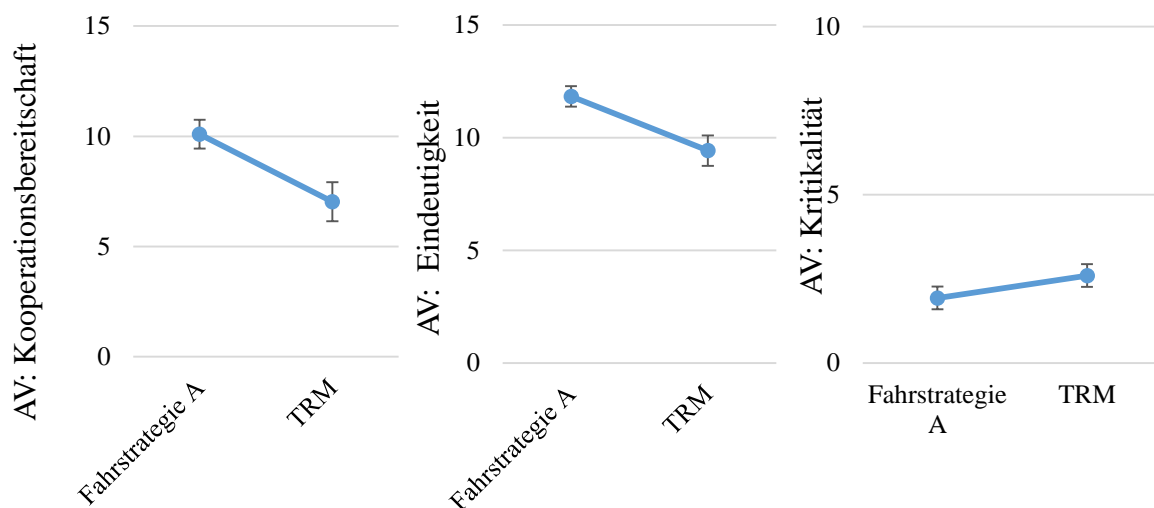


Abbildung 52. Mittelwerte und Standardfehler von wahrgenommener Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität.

10.2.6.2 Deskriptive Ergebnisse

Von $N = 30$ hat sich ein Proband enthalten, den Vorforschfragebogen auszufüllen, somit lagen $N = 29$ vollständige Datensätze vor. Das Gesamtbild bzgl. des autonomen Fahrens war überwiegend positiv: Hinsichtlich der Einstellung (siehe Abbildung 53; Begeistert: $n = 16$; Eher begeistert:

$n = 12$; Eher beängstigend: $n = 1$; Beängstigend: $n = 0$), der Verwendung neuer Technologien (fünfstufige Likert - Skala; „*Ich bin neugierig auf die Verwendung dieser Technologie*“; $n = 27$ stimmten sehr zu; $n = 2$ stimmten eher zu) und dem Vertrauen technischen Geräten gegenüber (siehe Abbildung 53; fünfstufige Likert - Skala; „*Mir fällt es schwer, technischen Geräten zu vertrauen*“; Stimme sehr zu: $n = 0$; Stimme eher zu = 4; Teils Teils $n = 6$; Stimme eher nicht zu $n = 9$; Stimme überhaupt nicht zu: $n = 9$)

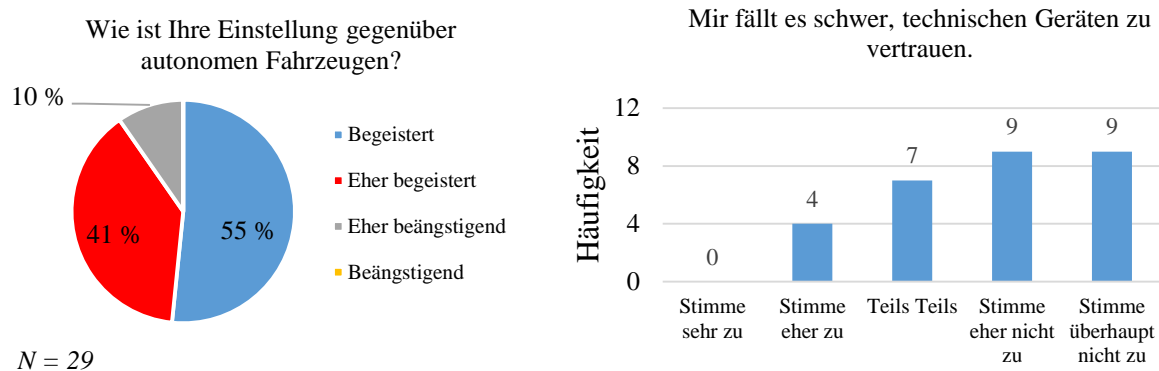


Abbildung 53. Einstellung/Vertrauen zum autonomen Fahren

Das Ergebnis des Fahrstils des eigenen Fahrzeuges bzw. des Fahrzeuges mit dem der Fahrer interagiert zeigte sich in Abbildung 54. Zusätzlich hatten die Probanden die Möglichkeit, in dem freien Antwortformat noch Kommentare zu äußern.

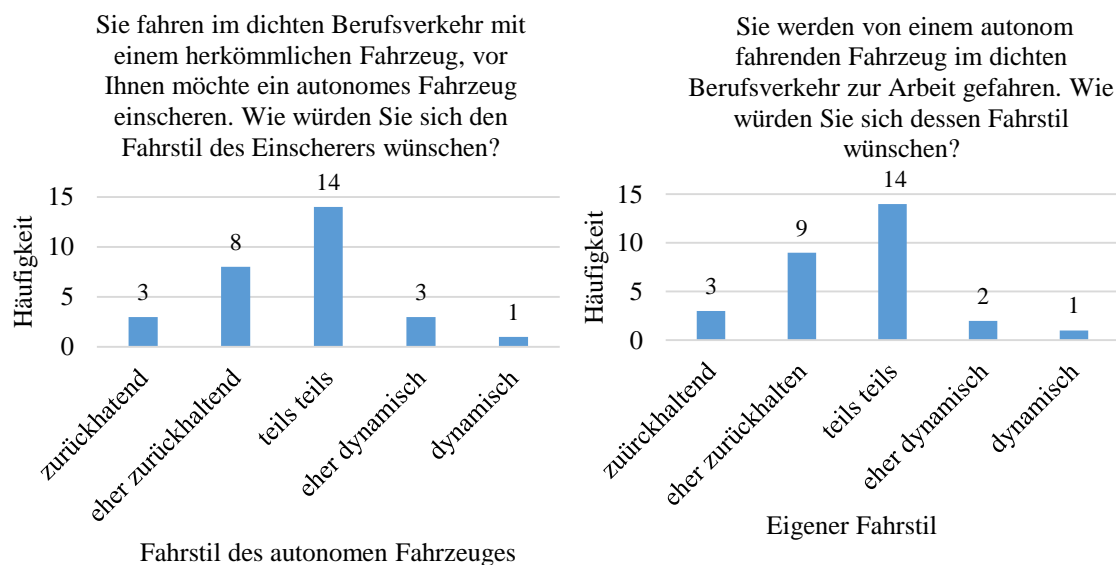


Abbildung 54. Deskriptive Darstellung der Antworten bzgl. des Wunschfahrstils a. des eigenen als auch bzgl. des anderen Fahrzeuges.

Basierend auf Mc Lellan, McQueen und Neidig (2003) wurden strukturierte Gesprächsnotizen verwendet, um die qualitativen Aussagen zusammenzufassen. Diese können wie folgt (siehe Tabelle 32) zusammengefasst werden:

Tabelle 32. Geäußerte Wünsche Fahrstil des autonomen Fahrzeuges

Wünsche	Häufigkeit der Nennung
Rücksichtsvolles Fahren	5
Eindeutig erkennbare Absicht	5
Zügig und Kontrolliert	5
Nicht den Verkehrsfluss behindernd	5
Fahren wie menschliche Fahrer	4
Vorsichtiges Fahren	1
Sichere Fahrweise	2

Die geäußerten Wünsche stimmen mit den inferenzstatistischen Ergebnissen überein.

10.2.7 Diskussion

Ziel dieser Studie war es herauszufinden, ob das Fahrverhalten, welches in Bezug auf menschliche Fahrern als kooperativ empfunden wird, sich auch in der Einstellung hinsichtlich automatisierten Fahrzeugen widerspiegelt. Im Zuge dessen wurde eine Studie in einer Sitzkiste durchgeführt und eine, aus den im Rahmen der Dissertation durchgeführten Studien abgeleitete, Spurwechselstrategie, mit einer herkömmlichen, in PELOPS integrierten Fahrstrategie TRM bzgl. wahrgenommener Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität verglichen. Vorab wurden die Teilnehmer über ihre Einstellung zu autonomen Fahren und ihren Wünschen diesbezüglich gefragt. Es zeigte sich, dass die Teilnehmer grundsätzlich eine positive Haltung gegenüber autonomen Fahrzeugen und auch ein hohes Vertrauen gegenüber neuen Technologien hatten. Dies kann durch die aktuelle Literatur, die sich mit der Haltung gegenüber automatisierten beschäftigt bestätigt werden (Feldhütter, Gold, Hüger, & Bengler, 2016; Mcknight, Carter, & Thatcher, 2011; Rödel et al., 2014). Hinsichtlich des bevorzugten Fahrstils zeigte sich die Tendenz, dass die Teilnehmer sich bei ihrem eigenen als auch bei dem umgebenden Verkehr einen Fahrstil des automatisierten Fahrzeuges wünschten, der situationsabhängig agiert. Anhand der Kommentare lässt sich erkennen, dass den Teilnehmern vor allem wichtig war, dass sich das Fahrzeug sicher und kontrolliert verhält und eindeutig seine Absicht kommunizieren sollte. Ein wichtiger Punkt war zusätzlich die Nennung, dass das Fahrzeug nicht den Verkehrsfluss aufhalten sollte, was die vorherige Äußerung der situationsabhängigen Fahrweise noch unterstreicht. Literatur hinsichtlich des Fahrstils des automatisierten Fahrzeuges bezieht sich vor allem auf die Innenperspektive aus dem Fahrzeug heraus. Hier zeigten sich übereinstimmende Ergebnisse (Lange, Maas, Albert, Siedersberger, & Bengler, 2014), dennoch wird vor allem der Komfortaspekt für den Insassen betont (Bellem, Schönenberg, Krems, & Schrauf, 2016; Scherer et al., 2015). Was die Interaktion zwischen Menschen und automatisierten Fahrzeugen angeht, kann vor allem auf Literatur zwischen Fußgängern und automatisierten Fahrzeugen zurückgegriffen werden (Beggiato & Krems,

2013; Müller et al., 2016; Schmidt & Färber, 2009; Witzlack et al., 2016). Hier wird besonders der Aspekt der eindeutigen Kommunikation betont (Schmidt & Färber, 2009). Die Ergebnisse der Fahrsimulatorstudie zeigten, dass die Teilnehmer die neu entwickelte Spurwechselstrategie als kooperativer und eindeutiger wahrgenommen hatten. Ein signifikanter Unterschied konnte hinsichtlich der Kritikalität nicht gefunden werden. Die Ergebnisse der wahrgenommenen Kooperationsbereitschaft und Eindeutigkeit legen nahe, dass menschliche Fahrer es durchaus bevorzugen, dass sich ein automatisiertes Fahrzeug einem menschlichen Fahrer ähnlich verhält. Dies wird durch die Ergebnisse der Vorabbefragung zusätzlich unterstrichen. Hinsichtlich Kritikalität wurden beide Strategien ähnlich bewertet. Dies kann daran liegen, dass die Situation dadurch, dass immer der Blinker gesetzt wurde als auch im Niedriggeschwindigkeitsbereich gefahren wurde subjektiv nie als kritisch erachtet worden ist. Zusätzlich waren sich die Teilnehmer bewusst, dass sie sich in der Sitzkiste in einem künstlichen Setting befanden, in der es nie zu einer potentiellen Gefährdung hätte kommen können. Auf die methodischen Limitationen soll in der Gesamtdiskussion (Kap. 10.5) eingegangen werden, da diese sowohl für die Evaluationsstudie Spurwechselstrategie als auch die nachfolgende Bremsstrategie galten.

Evaluationsstudie Bremsstrategie

Die Evaluationsstudie Spurwechselstrategie lieferte Hinweise, dass eine dem menschlichen Fahrverhalten nachempfundene kooperative Spurwechselstrategie als positiver empfunden wurde als die herkömmliche. Im nächsten Schritt soll diesmal aus Einschererperspektive beurteilt werden, ob dies auch für die Wahrnehmung des Bremsverhaltens eines automatisierten Fahrzeuges zutrifft.

10.3 Untersuchungsmethodik

10.3.1 Versuchsdesign

Ziel dieser Studie war es herauszufinden, ob eine Übertragbarkeit eines als kooperativ wahrgenommenen Verhaltens zwischen menschlichen Fahrern auf ein automatisiertes Fahrzeug erfolgen kann. Daraus lässt sich folgende Forschungsfrage und Hypothesen ableiten:

Forschungsfrage

Welche Fahrstrategie erhält eine bessere Bewertung hinsichtlich der Außenwirkung?

Hypothesen

Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft

H1: Die neue Bremsstrategie wird als kooperativer wahrgenommen als die ursprüngliche Fahrstrategie

Wahrgenommene Eindeutigkeit

H1: Die neue Bremsstrategie wird als eindeutiger wahrgenommen als die ursprüngliche Fahrstrategie

Wahrgenommene Kritikalität

H1: Die neue Bremsstrategie wird als weniger kritisch wahrgenommen als die ursprüngliche Fahrstrategie

Unabhängige Variablen

Im Fahrversuch erlebten die Studienteilnehmer zwei Fahrstrategien: Die neu entwickelte Bremsstrategie A und die Bremsstrategie B, basierend auf Wiedemann (1974) sowie eine Kontrollsituation, in der das Fahrzeug nicht bremste. In der Bremsstrategie A reagierte das Fahrzeug entsprechend der in der ersten Studie (Kap. 6) ermittelten Parameterkombination (0s, 1.5 m/s²; 4 m/s), während in der Bremsstrategie B das Fahrzeug erst dann reagierte, wenn der Einscherer in den Fahrschlauch fuhr und dann entsprechend runterregelte, um den Abstand von 2 s wieder zu gewährleisten. Näheres dazu findet sich in dem Unterkapitel „Beschreibung des Folgemodells von Wiedemann (1974) in der Verkehrssimulation PELOPS“. Die Situationen wurden in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Daraus ergab sich ein Versuchsplan mit Messwiederholung.

Abhängige Variablen

Die abhängigen Variablen entsprechen denen aus der ersten Studie (Kap. 6., siehe Tabelle 33). Die Fragestellung wurde entsprechend auf die Kommunikation zwischen menschlichen und automatisierten Fahrzeugen angepasst.

Tabelle 33. Darstellung der AV wahrgenommene Kritikalität und Kooperationsbereitschaft.

Abhängige Variablen	Frage	Einheit
Wahrgenommene Kritikalität	<i>Wie kritisch erschien die Situation?</i>	0 - 10, Kritikalitätsskala (Neukum et al., 2008)
Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft	<i>Wie kooperativ erschien das automatisierte Fahrzeug auf der Nachbarspur?</i>	1 bis 15, Zusatzkategorie 0 (KU-Skala, Heller, 1985)
Wahrgenommene Eindeutigkeit	<i>Wie eindeutig erschien das automatisierte Fahrzeug auf der Nachbarspur?</i>	1 bis 15, Zusatzkategorie 0 (KU-Skala, Heller, 1985)

10.3.2 Fahrsimulator

Die Beschreibung des Fahrsimulators entspricht der in der Evaluationsstudie Spurwechselstrategie genannten Darstellung (siehe Kap. 10.1.2).

Beschreibung des Folgemodells von Wiedemann in der Verkehrssimulation PELOPS

Das Folgemodell von Wiedemann (1974) gehört zu den psychophysischen Modellen (siehe Kap. 3.4.2). Entscheidungen für Aktionen sind abhängig von bestimmten Wahrnehmungsschwellenwerten. Diese definieren sich durch bestimmte Parameter wie das Sicherheitsbedürfnis oder das Schätzvermögen. Dadurch wird das Fahrverhalten in vier Bereiche geteilt:

Unbeeinflusstes Fahren definiert sich dadurch, dass kein Vorderfahrzeug vorhanden ist. Aufgrund dessen muss der sich Fahrer nicht auf das Verhalten des Vorderfahrzeuges konzentrieren, sondern kann entsprechend seiner Wunschgeschwindigkeit fahren. *Annähern* ist durch das Anpassen der Geschwindigkeit und Einhalten eines bestimmten Sicherheitsabstandes zu einem langsameren Vorderfahrzeug gekennzeichnet. Das *Folgen eines Vorderfahrzeuges*, impliziert einen geringen Geschwindigkeitsunterschied und das Einhalten eines bestimmten Abstandes. Der vierte Bereich besteht im *Bremsen*. Dies inkludiert, dass bei der Unterschreitung eines bestimmten Sicherheitsabstandes eine Reaktion, in dem Fall eine Geschwindigkeitsreduktion ausgelöst wird, um einen Zusammenstoß zu vermeiden.

Das Folgemodell (Wiedemann, 1974) erlaubt Untersuchungen gängiger Fahrerassistenzsysteme wie zum Beispiel dem ACC und funktioniert nach demselben Regelprinzip. Das Sensormodell kann individuell eingestellt werden. Für diese Studie wird ein aktuelles ACC mit dem entsprechenden Erfassungsbereich der Sensorik abgebildet. Das bedeutet, dass das Fahrzeug erst dann auf einen Einscherer reagiert, wenn dieser in den Sensorerfassungsbereich des Folgefahrzeuges hineinfuhr und dann, entsprechend den Voreinstellungen, den Abstand des Fahrzeuges zum Vorderfahrzeug anpasste.

10.3.3 Fahrszenario

Die Versuchsumgebung entsprach der Umgebung aus der ersten Studie (siehe Kap.6.2.3). Auf einer dreispurigen Autobahn mit dichtem Verkehr fuhren Fahrzeuge auf der mittleren Spur mit 30 km/h. Der Abstand zwischen den Fahrzeugen wurde auf 2 s festgelegt. Die Teilnehmer folgten in einem Tempo von 10 km/h einem Vorderfahrzeug auf der rechten Fahrspur.

10.3.4 Durchführung

Die Studie dauerte insgesamt 40 Minuten.

1. Einführung (Dauer bis ca. 15 min): Aufbau wie bei der Evaluationsstudie Spurwechselstrategie (siehe Kap. 9.2.4) beschrieben

2. Eingewöhnungsfahrt (Dauer ca. 10 min): Verlauf wie in Evaluationsstudie Spurwechselstrategie (siehe Kap. 9.2.4) beschrieben

3. Testfahrt (Dauer ca. 15 min): Die Aufgabe der Probanden war es, dem Vorderfahrzeug auf der rechten Fahrbahn zu folgen. Auf der mittleren Fahrspur tauchte alle 2 Minuten eine Kolonne bestehend aus automatisierten Fahrzeugen auf. Bei der Blinkersetzung wurde ihnen der Hinweis gegeben, sich entsprechend der Reaktion des Folgefahrers, für oder gegen einen Spurwechsel zu entscheiden. Nach jeder Entscheidung über einen Spurwechsel wurden die Teilnehmer gebeten, eine subjektive Bewertung ihrer wahrgenommenen Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität abzugeben.

4. Abschlussgespräch

Es erfolgte eine Nachbesprechung der Studie mit anschließender Verabschiedung.

10.3.5 Stichprobe

Die Rekrutierung der Teilnehmer erfolgte über den internen BMW Verteiler. An dieser Studie nahmen insgesamt $N = 31$ (23 männlich) Probanden teil. Das Durchschnittsalter betrug 27.7 Jahre ($SD = 4.45$ Jahre). Die jährliche mittlere Fahrleistung entsprach 5 - 10.000 km.

10.3.6 Ergebnisse

Zur Auswertung der Unterschiede zwischen der ursprünglichen und der neu entwickelten Strategie wurde ein t-Test für abhängige Stichproben eingesetzt. Zur Analyse der ermittelten Daten wurde ein t-Test für abhängige Stichproben verwendet. Es zeigte sich, dass Bremsstrategie A als signifikant unkritischer bewertet wurde als Bremsstrategie B mit $t(30) = -10.54, p < .001, r = .89$. Zudem wurde die Bremsstrategie A als kooperativer wahrgenommen als die Bremsstrategie B mit $t(30) = 11.89, p < .001, r = .91$. Dies spiegelte sich auch in der wahrgenommenen Eindeutigkeit wider ($t(30) = 2.65, p < .001, r = .79$; Abbildung 55).

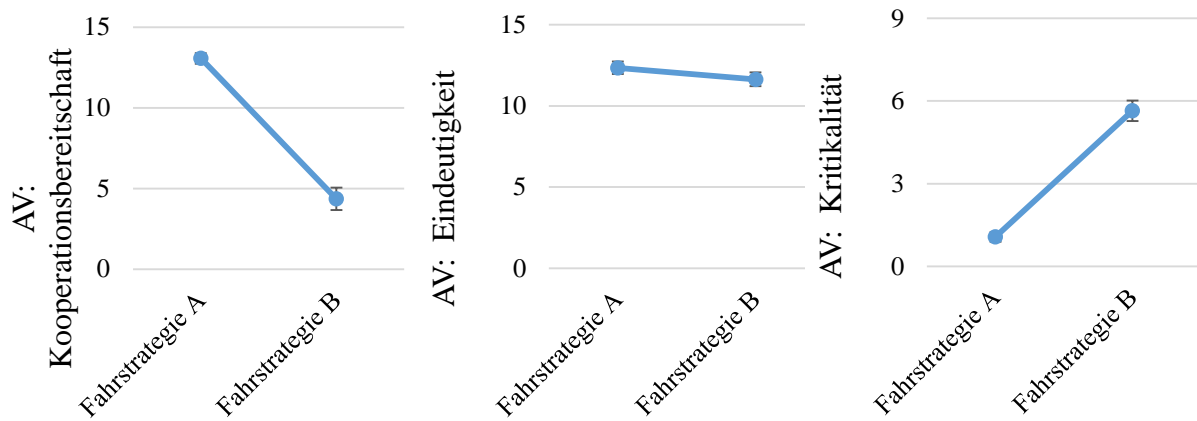


Abbildung 55. Mittelwerte und Standardfehler hinsichtlich wahrgenommener Kooperationsbereitschaft, Eindeutigkeit und Kritikalität.

10.4 Diskussion

In der Studie wurde basierend auf der ersten Studie (Kap. 6) eine kooperative Bremsstrategie entwickelt. Ziel war es herauszufinden, wie die Reaktion eines automatisierten Fahrzeuges auf menschliche Fahrer wirkt und wie diese im Vergleich zur bereits implementierten Strategie bewertet wird. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die auf der ersten Studie basierende Fahrstrategie A besser bewertet wird als die Fahrstrategie B. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die ursprüngliche Bremsstrategie, aufgrund der Sensorik, die dem Stand eines aktuellen ACCs entspricht, reagierte, wenn der einscherende Fahrer in den Erfassungsbereich des Fahrschlauches kam. Dadurch verzögerte das Fahrzeug erst sehr spät und regelte die Geschwindigkeit entsprechend stark auf den eingestellten Sicherheitsabstand herunter, was nach außen einer ruckartigen Bewegung gleichkam. Die entwickelte Bremsstrategie dagegen reagierte bereits auf das Blinksignal des einscherenden Fahrzeuges proaktiv mit der ermittelten Parameterkombination aus Studie 1, bevor es noch stärker verzögerte, um den entsprechenden Sicherheitsabstand einzuhalten. Dies kam aus der Wahrnehmung der Teilnehmer heraus einer weniger abrupten Reaktion gleich. Im Gegensatz zur herkömmlichen Fahrstrategie B wurde proaktiv die Bereitschaft zur Interaktion mit dem einscherenden Fahrzeug signalisiert. Fahrstrategie A wurde zudem weniger kritisch bewertet, weil das automatisierte Fahrzeug einen sichereren Eindruck vermittelt haben könnte, als die Ursprungsstrategie.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass eine Einbeziehung der subjektiven Außenwahrnehmung eine positivere Bewertung mit sich bringen könnte. Zusätzlich wird die bestehende Literatur erweitert, indem die Bremsstrategie A aufzeigt, dass bereits geringe Verzögerungswerte ausreichend sind, um nach außen vom umgebenden Verkehr wahrgenommen zu werden. Dies würde sich positiv auf das Komfortempfinden der Fahrzeuginsassen auswirken.

10.5 Gesamtdiskussion der automatisierten Strategien

Sowohl die neu entwickelte Spurwechsel- als auch Bremsstrategie wurden beide als kooperativer und eindeutiger bewertet als die Ursprungsstrategien. Dies bedeutet einen Gewinn, der durch eine derartige Anpassung erzielt werden kann, wenn es um die Gestaltung zukünftiger automatisierter Fahrstrategien geht.

Die Ergebnisse zeigen auf, dass es durchaus sinnvoll und notwendig ist, die Forschung in diesem Bereich zu intensivieren, dennoch müssen einige Punkte aufgezeigt werden.

Die Stichprobenzusammensetzung bestand in dieser Studie aus BMW Mitarbeitern, die somit eine gewisse Affinität zum autonomen Fahren mit sich bringen. Eine Studie (Locascio, Khurana, He, Kaye, & City, 2016), die Unterschiede zwischen Mitarbeitern und Nichtmitarbeitern bei der Bewertung von Mobil- und Webanwendungen untersuchte, zeigte dass beide Gruppen die Anwendungen ähnlich bewerteten und sich nur Unterschiede fanden, wenn zwischen den firmeneigenen und Wettbewerbsprodukten bewertet werden musste. Dennoch sollten in zukünftigen Studien, wenn möglich Teilnehmer, die nicht in der Automobilbranche tätig sind, bevorzugt werden.

Ein weiterer Diskussionspunkt ist die Notwendigkeit, weitere Anwendungsszenarien zu betrachten: Das menschliche Fahrverhalten muss auch in anderen Situationen des Straßenverkehrs analysiert werden. Dies inkludiert beispielsweise unterschiedliche Situationen und Umgebungen (z.B. Stadtszenarien oder ländliche Umgebungen). Ein Beispiel wäre die Kommunikation in Situationen mit Ampelausfall oder bei einem Unfall.

Zudem sollten interkulturelle Studien durchgeführt werden, da sich das Kommunikationsverhalten länderspezifisch voneinander unterscheidet (Robertson, Meister, Vanlaar, & Mainegra Hing, 2017; Wang et al., 2013). So zeigen chinesische Fahrer tendenziell eher einen aggressiven Fahrstil, was sich in kleineren TTCs und THWs äußern kann (Wang et al., 2013).

Auch andere Faktoren wie Dringlichkeit, Risiko zu kollidieren (Kita, 1999; Talebpour, Mahmassani, & Hamdar, 2015) müssen in den Entscheidungsprozess mit einbezogen werden. Die Erkenntnisse daraus müssten entsprechend in die Entwicklung des Algorithmus einfließen. Dies kann beispielsweise regelbasiert erfolgen, indem basierend auf den Erkenntnissen der Forschung die Parameter für die Situationen entsprechend eingestellt werden oder über maschinelles Lernen (siehe Kap. 11), indem die Daten entsprechend der subjektiven Wahrnehmung als gelabelte Daten in den Algorithmus mit einfließen.

Zudem wären Studien im Realverkehr notwendig, da sowohl die Studien während der Explorationsphase zur Bestimmung der implementierten Fahrparameter, als auch die

Evaluationsstudien im Fahrsimulator durchgeführt wurden. Zusätzlich wussten die Teilnehmer, dass sie sich in einer Testsituation befanden, was Verzerrungen und Effekte der sozialen Erwünschtheit mit sich bringen kann. Untersuchungen im Realverkehr sind daher unerlässlich. Eine mögliche Option um dieses Problem zu umgehen, wäre die Durchführung mit einem Wizard of Oz Fahrzeug (Habibovic et al., 2016) auf einer Teststrecke, wobei denen der Teilnehmer in dem Glauben gelassen wird, dass er mit einem autonomen Fahrzeug interagiert. Dies wurde bereits in der Forschung zum Interaktionsverhalten zwischen einem Fußgänger und einem autonomen Fahrzeug angewandt (Rothenbücher et al., 2016). Die Durchführung einer derartigen Studie war zu diesem Zeitpunkt aufgrund von offenen rechtlichen Themen zu diesem Zeitpunkt nicht möglich.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass diese Studien die Wichtigkeit demonstriert haben die Außenwahrnehmung miteinzubeziehen, wenn es um die Entwicklung von automatisierten Fahrstrategien geht. Sie liefern einen ersten Ansatz bzw. Impuls für die Entwicklung einer kooperativen Strategie und können als Ausgangsbasis für weitere Entwicklungen in dem Bereich genutzt werden. Dies würde sowohl zu einer positiveren Außenwirkung von autonomen Fahrzeugen beitragen und damit deren Akzeptanz erhöhen als auch das Risiko der Reaktanz durch eine falsch interpretierte Situation minimieren.

11 Exkurs: Entwicklung eines Machine Learning (ML) Algorithmus

11.1 Einleitung

Dieses Kapitels soll einen Einblick in die Methode des Maschinellen Lernens geben und aufzeigen wie die in einer Studie (Kap. 8) gewonnenen Daten weiterverarbeitet werden können, um darauf basierend einen kooperativen Algorithmus zu entwickeln.

Somit ist es das Ziel, einen kooperativen Algorithmus für ein autonomes Fahrzeug bei der Fahrstreifenwechselankündigung zu entwickeln, welches sich so verhält, dass es vom Folgefahrer positiv wahrgenommen wird. Maschinelles Lernen ist eine der Methoden, die im Bereich des autonomen Fahrens für verschiedene Fragestellungen, angefangen von Fahrerzustandserkennung bis hin Situationsklassifikationen eingesetzt werden. Diese Methode kommt vor allem dann zum Einsatz, wenn Expertenbewertungen zu einem bestimmten Sachverhalt vorliegen, die Klassifikation von allen möglichen Situationen aber zu aufwendig wäre. In diesem Fall liegen beispielsweise Expertenmeinungen hinsichtlich wahrgenommener Kooperationsbereitschaft vor. Da es zu aufwendig wäre alle möglichen Situationen hinsichtlich

dessen in Form von Studien zu untersuchen, könnte in dem Fall Maschinelles Lernen eingesetzt werden.

Ziel wäre hier, basierend auf einem von Menschen gelabelten Datenset Maschinelles Lernen anzuwenden, um Modelle mit einer bestimmten Vorhersagekraft zu entwickeln, die Aussagen über allgemeine Gesetzmäßigkeiten machen können (Ben-David & Shalev-Shwartz, 2014). Dabei orientiert sich das Vorgehen am Cross-Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM). CRISP-DM ist ein industriell etablierte Standardprozess für Data Mining und Knowledge Discovery Projekte und stellt eine Orientierung zur Vorgehensweise dar (Smart Vision Europe Ltd., 2018).

In diesem Kapitel soll eine Brücke zwischen einer psychologischen Herangehensweise und Weiterverwendung der Daten im technischen Kontext geschlagen werden, um eine Schnittmenge zwischen beiden Wissenschaften aufzuzeigen.

Durch den entwickelten Klassifikator kann eine Spurwechselentscheidung im Rahmen eines Spurwechselszenarios im dichten Verkehr für hochautomatisierte Fahrzeuge unterstützt werden. Zunächst wird in **Kap. 11.2** allgemein auf die Grundlagen und das Vorgehen beim maschinellen Lernen eingegangen. **Kap. 11.3** erläutert das Vorgehen bei der Analyse und Auswertung der Daten und schließt mit einer Diskussion (**Kap. 11.4**).

11.2 Einführung in die Methode des maschinellen Lernens (ML)

Sinn und Zweck von maschinellem Lernen ist es, aus Beispielen anhand eines Datensatzes zu lernen und darauf basierend Generalisierungen über bestimmte Gesetzmäßigkeiten machen zu können. Dies kann man in Analogie zum Menschen betrachten, der Erfahrungen macht und darauf basierend Schlüsse für zukünftige Entscheidungen zieht. Es existieren verschiedene Formen von maschinellem Lernen. Vorrangig unterscheidet ML zwischen unüberwachtem Lernen (auf Englisch „*unsupervised learning*“) und überwachtem Lernen (auf Englisch „*supervised learning*“).

Diese unterscheiden sich darin, dass beim unüberwachten Lernen nur Eingangsdaten und beim überwachten Lernen Eingangs- und Ausgangsdaten herangezogen werden. Das heißt, dass es beim überwachten Lernen einen vorhandenen Datensatz gibt, dessen Daten bereits in Klassen unterteilt wurde. In diesem Fall sind es Daten aus der dritten Studie (Kap.8), die basierend auf den subjektiven Bewertungen der Teilnehmer in kooperative und unkooperative Spurwechsel eingeteilt werden konnten. In der Studie gab es basierend auf den Parameterkombinationen insgesamt neun verschiedene Situationen, die die Probanden durchlaufen haben. Somit kam nie die exakt gleiche Kombination aus Proband und Situation doppelt vor, weshalb in einem Training keine Daten doppelt verwendet werden. Beim unüberwachten Lernen, versuchen

Algorithmen basierend auf großen Datenmengen wiederkehrende Muster und Gesetzmäßigkeiten zu finden. Diese werden dann in sog. Cluster gruppiert. Cluster zeichnen sich dadurch aus, dass Daten innerhalb einer Gruppe große Ähnlichkeiten im Gegensatz zu anderen Clustern aufweisen. Algorithmen wie neuronale Netze oder Hidden Markov Models finden hier v.a. Anwendung (Kubat, 2017). Da der Fokus in dieser Arbeit auf überwachtem Lernen liegt, wird nicht näher auf unüberwachtes Lernen eingegangen.

Ziel des überwachten Lernens ist es, eine Funktion zu finden, die basierend auf den Eingangsdaten, die Ausgangsdaten bestmöglich beschreibt. Mit dieser Funktion können anschließend bei neuen Eingangsdaten, die Ausgabewerte prognostiziert werden. Einfach ausgedrückt entsprechen die Eingangsdaten der Erfahrung bzgl. eines bestimmten Sachverhaltes. Diese wird in Expertenwissen umgewandelt, ausgedrückt durch eine hohe Modelgüte. Die Modelgüte verbessert sich bei wachsender Anzahl an Daten, mit denen gelernt werden kann. Beim überwachtem Lernen unterscheidet man zwischen zwei Formen von Ausgabewerten: Sind diese diskret, werden Klassen ausgegeben. Man spricht hier von Klassifikation. Wenn kontinuierlich Werte ausgegeben werden, spricht man von Regression (siehe Abbildung 56, Kotsiantis, 2007). Beispiele für Algorithmen, die in den jeweiligen Bereichen verwendet werden, finden sich in Tabelle 34 (Jordan & Mitchell, 2015).

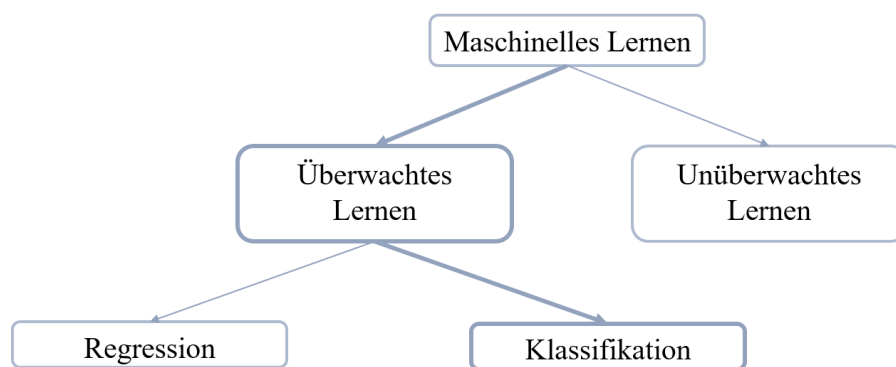


Abbildung 56. Formen von ML.

Tabelle 34. Typische Algorithmen von überwachtem Lernen

Klassifikation	Regression
Logistische Regression	Lineare Regression
Support Vector Machine	Generalized Linear Model
Diskrimanzanalyse	Gaussian Process Regression
Naive Bayes Klassifikatoren	

11.3 Vorgehensweise

Ziel ist es, einen kooperativen Algorithmus für ein autonomes Fahrzeug bei der Fahrtreifenwechselankündigung zu entwickeln, welches sich so verhält, dass es vom Folgefahrer positiv wahrgenommen wird. Die Datenbasis liefert hierzu die dritte Studie (Kap. 8).

Beim ML werden einzelne standardisierte Schritte bei der Entwicklung eines Modells durchlaufen (Smart Vision Europe Ltd., 2018), die hier kurz beschrieben angewendet werden. Nach der Datengenerierung und -import in z. B. Matlab erfolgt die Sichtung und Aufbereitung der Daten (auf Englisch „*Preprocessing*“), d.h. es wird nach Ausreißern und fehlenden Daten gesucht. Aus den Daten werden im nächsten Schritt Merkmale (auf Englisch „*Features*“) ausgewählt. Die Auswahl der Features erfolgt je nach Datentyp anhand verschiedener spezifischer Methoden. Eine zu hohe Anzahl an Features birgt die Gefahr des „*Overfitting*“, eine Überanpassung der Daten, was eine Verschlechterung der Modelgüte mit sich bringt. Beim überwachten Lernen werden am häufigsten filter-, wrapper- und embedded Modelle genutzt (Tang, Alelyani & Liu, 2014; Jovic, Brkic, & Bogunovic, 2015). Die Daten werden in einem bestimmten Verhältnis in Test- und Trainingsdaten geteilt und im Anschluss wird anhand spezifischer Kriterien ein Model selektiert und das Modell entsprechend trainiert. Im letzten Schritt wird die Güte des Modells über verschiedenen Verfahren (z.B. k-fache Kreuzvalidierung, Konfusionsmatrix oder ROC Kurve) betrachtet und je nach Ergebnis erfolgt eine Überarbeitung des Modells. So kann beispielsweise das Entfernen bzw. Hinzufügen von Features die Modelgüte verbessern. Oder es werden andere Algorithmen für die Modellentwicklung benutzt, die ggf. die Daten besser trennen können. Eine Übersicht der einzelnen Schritte liefert Abbildung 57.

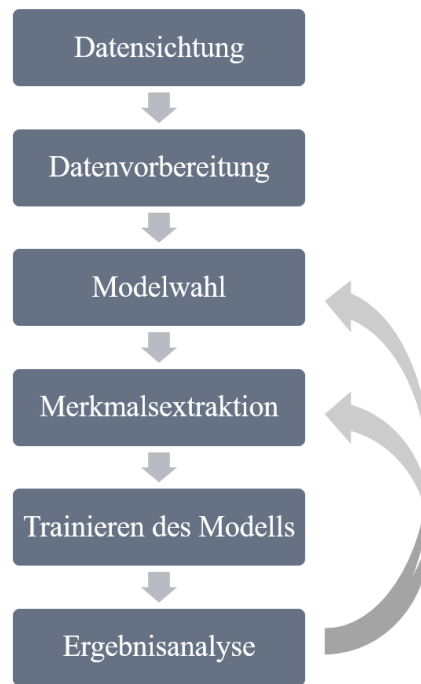


Abbildung 57. Vorgehensweise maschinelles Lernen in Anlehnung an Smart Vision Europe Ltd. (2018).

11.3.1 Datensichtung

Insgesamt wurden Daten von 72 verschiedenen Probanden aufgezeichnet. Diese waren nach Parametern, die das Fahrverhalten des Probanden beschrieben (z.B. Beschleunigung, Geschwindigkeit, Gierwinkel usw.) als auch Umgebungsvariablen (z.B. Abstände zu anderen Fahrzeugen, Spurbreite, -krümmung) gegliedert und enthielten für alle 20 ms Schritte einen Datensatz. Zusätzlich standen Videoaufzeichnungen zur Verfügung, die wenn nötig eine genauere Interpretation der Situation zuließen.

11.3.2 Datenvorbereitung

In dieser Phase geht es vor allem darum, die Daten auf fehlende Werte hin zu überprüfen und entsprechend zu bereinigen. Fehlende Daten können durch Fehler in den Aufzeichnungen der Daten oder Fehlern in der Software, während der Probandenstudie entstehen. Ein anderer Grund ist, wenn die Instruktion durch den Versuchsleiter von dem Teilnehmer nicht richtig verstanden wird, der Proband Ermüdungserscheinungen zeigt oder abgelenkt ist. Die fehlenden Daten konnten durch Interpolation oder Ersetzung durch den Mittelwert approximiert werden. Alle Ausreißer größer zwei Standardabweichungen wurden aus dem Datensatz entfernt.

11.3.3 Datenbeschriftung

Während der Probandenstudie (Kap. 8) erfolgte eine Bewertung der Fahrstreifenwechselankündigung über die Teilnehmer auf einer 15 stufigen Skala, wie sehr sie

die Kooperationsbereitschaft des anderen Fahrzeuges wahrgenommen hatten. Da für das weitere Vorgehen positive und negative Beispiele notwendig sind, werden die Daten in zwei Klassen aufgeteilt. Für die Erstellung der Klassen waren zwei Bedingungen relevant: Die subjektive Bewertung der Kooperationsbereitschaft als auch die Information, ob ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt worden ist. Pro Situation erhielten alle Daten dasselbe Label. Wenn diese zwei Bedingungen erfüllt waren, wurde ein positives Label vergeben. Werte zwischen 0 bis 6 wurden als unkooperativ und Werte zwischen 10 bis 15 als kooperativ markiert. 7 bis 9 konnten nicht eindeutig zugeordnet werden und wurden aus dem Datensatz entfernt (siehe Abbildung 58).

Wie kooperativ erschien der Fahrer auf der rechten Spur?

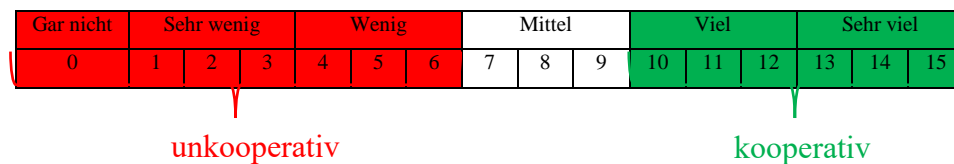


Abbildung 58. Antwortformat zur Beurteilung der wahrgenommenen Kooperationsbereitschaft.

Tabelle 35 enthält die Optionen der Zuteilung der Werte in die Klassen 1 (kooperativ) und 0 (nicht kooperativ).

Wurde kein Spurwechsel vollzogen, schließt das einen kooperativen Spurwechsel aus (**Fall 1**). Im **Fall 2** (Spurwechsel vollzogen aber nicht als kooperativ empfunden), könnte der Spurwechsel z.B. auch erzwungen worden sein, deswegen erhielt er ebenfalls die Ergebnisklasse 0. **Fall 3** konnte im Datensatz vorkommen, da die Probanden gefragt wurden, immer die Kooperationsbereitschaft des Fahrzeuges zu bewerten. Diese Daten werden im Training nicht verwendet, da die Probanden trotz eines kooperativ empfundenen Verhaltens keinen Spurwechsel ermöglicht haben. Ein Grund dafür könnte sein, dass sie in der Situation den Abstand nicht richtig einschätzen konnten. Ein kooperativer Spurwechsel bestand nur, wenn ein Spurwechsel vollzogen und es vom Fahrer des zukünftigen Folgefahrzeugs als kooperativ empfunden wurde. Dieser erhielt dann die Ergebnisklasse „1“ (**Fall 4**).

Tabelle 35. Klassenzuordnung (In Anlehnung an Rinder, 2018).

	Wahrgenommene Kooperationsbereitschaft	Spurwechsel vollzogen?	Klassenzugehörigkeit
Fall 1	< 7	nein	0
Fall 2	< 7	ja	0
Fall 3	> 9	nein	Nicht verwendet
Fall 4	> 9	ja	1

11.3.4 Modellauswahl

Die Wahl für einen Algorithmus hängt von verschiedenen Faktoren ab: Dies ist u.a. abhängig von der Trainings- und Vorhersagegeschwindigkeit, der Speichernutzung, der Vorhersagegenauigkeit und der Interpretierbarkeit (Kotsiantis, 2007).

In dem vorliegenden Anwendungsfall wurde die logistische Regression verwendet. Die Entscheidung wird durch die folgenden Eigenschaften unterstützt (Xue et al., 2008; Gareth, Witten, Hastie & Tibshirani, 2013):

- In der logistischen Regression ist direkt einsehbar, welche Parameter in das Modell einfließen und welche Parameter den größten Erklärungswert bieten.
- Die logistische Regression kann auch dann eingesetzt werden, wenn die Eingangsdaten im Gegensatz zum naiven Bayes - Klassifikator korrelierte Merkmale enthalten.
- Die Ausgabe der Klassifikation ist eine wahrscheinlichkeitsbasierte Klassenzuordnung
- Sie ist beständig gegen Overfitting (Dies bedeutet, dass das Modell zu viele Variablen enthält, die keinen Erklärungswert liefern).
- Schnelles Trainieren und Vorhersagen neuer Werte ist möglich

11.3.5 Merkmalsselektion

Ziel der Merkmalsselektion ist es Parameter oder Parameterkombinationen bzw. Features zu finden, die das Modell hinreichend gut beschreiben und eine klare Trennung der Daten in unkooperativ und kooperativ zulassen. Im ersten Schritt wurde zunächst ein Zeitraum definiert, in dem die Merkmale betrachtet werden. Als Zeitraum wurde die Fahrstreifenwechselankündigungsphase gewählt. Diese ist dafür ausschlaggebend, wie ein Fahrer, der einscheren möchte, wahrgenommen wird. In dieser Phase wird die Entscheidung des Folgefahrers getroffen, ob er diesen einscheren lassen möchte. Dabei wird der Fokus auf den Zeitraum 3 s vor dem Überqueren der Fahrbahnmarkierung gelegt, da sich dieser für die Vorhersage der Spurwechselprädiktion als geeignet erwiesen hat (Doshi & Trivedi, 2009).

Für den Start der Fahrstreifenwechselankündigung erwies sich der Beginn der lateralen Bewegung bei $|v_{lat,EF}| = 0.15 \text{ m/s}$ als sinnvoll. Basierend auf der Literatur wurde eine Vorauswahl getroffen (Rehder et al., 2016a; Salvucci & Mandalia, 2007; Wissing, Nattermann, Glander, Hass, & Bertram, 2017; Marczak, Daamen, & Buisson, 2013). Durch schrittweises Hinzufügen und Ergänzen von Features erfolgt eine optimale Anpassung des Modells, bis das Modell keine Verbesserung mehr zeigte. Hinweise für die Wahl der Merkmale liefert die Literatur bzw. die Gewichtung der Parameter in der logistischen Regression. Daraus ist ersichtlich, welche Parameter den größten Vorhersagewert hatten und welche vernachlässigt

werden konnten. Zudem wurde darauf geachtet, dass die Parameter nicht zu hoch miteinander korrelieren, um die Komplexität aus dem Modell zu nehmen (Guyon & Elisseeff, 2003; Jovic, et al., 2015). Die Ergebnisse der dritten Studie (Kap. 8) lieferten einen Hinweis, welche Parameter eine große Vorhersagekraft liefern konnten: Die laterale Position als auch die Dauer der lateralen Positionierung. Dies konnte durch die Gewichtungen der Parameter im Modell bestätigt werden (siehe Tabelle 36). Zusätzlich wurde noch ein dritter Faktor gefunden. Dieser wird im Folgenden näher erläutert.

Tabelle 36. Übersicht der verwendeten Features mit entsprechenden Gewichtungsfaktoren (In Anlehnung an Rinder, 2018).

Feature	Beschreibung	β Gewichtung
$\Delta d_{lat, EF}$	Laterale Position des Einscherers zur Fahrtreifenmitte	$\beta_1 = +7.25$
$V_{lat, EF}$	Dauer der lateralen Positionierung des Einscherers	$\beta_2 = +11.92$
$e^{\frac{1s}{TTC_{FF}}} = e^{\frac{\Delta v_{FF} * 1s}{\Delta d_{FF}}}$	Modifizierter TTC- Wert zwischen Folgefahrer und Einscherer	$\beta_3 = - 4.32$

Der *TTC*-Wert vereint drei Variablen in einem Wert: die Geschwindigkeiten zweier Fahrzeuge und den Abstand beider Fahrzeuge in Längsrichtung. Für den Fall, dass die Geschwindigkeiten beider Fahrzeuge gleich sind bzw. die Geschwindigkeit des Folgefahrers größer als die des einscherenden Fahrers ist, wurde die *TTC* zwischen dem Folgefahrer und dem Einscherer invertiert und anschließend als Exponent der e-Funktion verwendet. Der Wert des Features steigt mit der Kritikalität der Situation an:

Ist der Folgefahrer langsamer als der Einscherer, ist die Situation unkritisch und der Einscherer kann einen Spurwechsel durchführen. Dies bedeutet zugleich, dass sich der Wert des Features zwischen Null und Eins befindet. Es kann geschlussfolgert werden, dass sich der Folgefahrer kooperativ verhält, da der Folgefahrer wahrscheinlich verzögert hat, um den einscherenden Fahrer einfädeln zu lassen. Wenn die Geschwindigkeit des Folgefahrers höher ist als die des einscherenden Fahrers und der Abstand beider Fahrzeuge sehr klein ist, weist dies auf eine kritische Situation hin. Somit steigt der Wert des Features stark an. Ein hoher Wert würde für unkooperatives Verhalten sprechen, da der Folgefahrer wahrscheinlich beschleunigt hat, um die Lücke vor sich zu schließen. Abbildung 59 zeigt eine hohe Trennbarkeit der Daten durch dieses Feature auf.

11.3.6 Trainieren des Modells

Für das Trainieren des Modells wurde eine k-fache stratifizierter Kreuzvalidierung verwendet. Diese hat den Vorteil, dass die einzelnen K Teilmengen eine gleiche Verteilung besitzen, was die Varianz verringert. Eine weite verbreitete Wahl ist es, die Daten in $K = 5$ oder $K = 10$

Teildatensets zu unterteilen (Little et al., 2017). In dieser Arbeit wurde eine Aufteilung mit $K = 5$ aufgrund des kleinen Datensets gewählt. Im zweiten Schritt des Trainings erfolgte ein Training mit ca. 80 % der Daten, während mit 20 % der Daten getestet wurden.

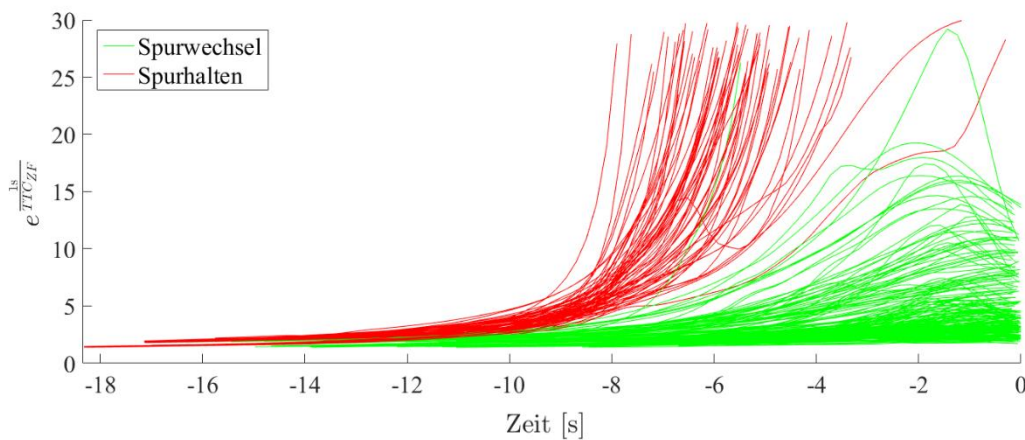


Abbildung 59. Darstellung der Trennbarkeit der Daten durch modifizierten TTC Wert (Quelle: Rinder, 2018).

11.3.7 Ergebnisanalyse

Tabelle 37 zeigt die Konfusionsmatrix zu den Zeitpunkten t_1 , t_2 und t_3 bzw. 1 s, 2 s und 3 s vor der Spurwechselinitiierung bzw. des Spurwechselabbruchs. Dieser Zeitraum wurde entsprechend der Literatur gewählt (Hetrick, 1997; Mourant & Donohue, 1974). Die Tabellenzellen zeigen die Anzahl der richtig klassifizierten Werte (auf Englisch „*True Positive*“ (TP)) und die Werte, die fälschlicherweise als richtig klassifiziert wurden (auf Englisch „*False Positive*“ (FP)). Zusätzlich werden die Werte angezeigt, die richtig klassifiziert haben, dass kein Spurwechsel stattgefunden hat (auf Englisch „*True Negative*“ (TN)) und die fälschlicherweise klassifiziert haben, dass kein Spurwechsel stattgefunden hat (auf Englisch „*False Negative*“ (FN)) angegeben. Aus der Tabelle 37 wird ersichtlich, dass der Zeitpunkt t_2 die besten Ergebnisse liefert.

Tabelle 37. Konfusionsmatrix für die Zeitpunkte t_1, t_2 und t_3 (Quelle: Rinder, 2018).

Vorhergesagt		Beobachtet	
		Kooperativer Spurwechsel	Kein Kooperativer Spurwechsel
Kooperativer Spurwechsel	t_1	146 (TP)	9 (FP)
	t_2	152 (TP)	9 (FP)
	t_3	150 (TP)	18 (FP)
Kein kooperativer Spurwechsel	t_1	13 (TN)	93 (FN)
	t_2	7 (TN)	93 (FN)
	t_3	9 (TN)	84 (FN)

Für die Bewertung wurde zusätzlich auf verschiedene Gütekriterien basierend auf der Konfusionsmatrix zurückgegriffen (Kuhn & Johnson, 2013; siehe Tabelle 38 und 39). Die

Bewertungsgrößen bewegen sich zwischen 0 % bis 100 %, wobei 100% das Optimum beschreibt.

Tabelle 38. Beschreibung der Bewertungsparameter.

Bewertungsparameter	Beschreibung
Sensitivität	Die Sensitivität (Recall): Wahrscheinlichkeit, dass ein positives Beispiel auch als positiv erkannt wird (TPR: True-positiv-rate) .
Spezifität	Wahrscheinlichkeit, dass ein negatives Beispiel auch als negativ erkannt wird. (FPR: False-positive-rate).
Positiver Vorhersagewert	Der positive Vorhersagewert stellt den Anteil der richtig als „1“ klassifizierten Datenpunkte an der Gesamtanzahl der als „1“ klassifizierten Datenpunkte dar.
Korrektklassifikationsrate	Diese repräsentiert den Anteil der korrekt klassifizierten Datenpunkte an der Gesamtanzahl der Datenpunkte. Sie ist als Treffergenauigkeit (auf Englisch „Accuracy“) der Klassifikation zu interpretieren.
F1- Wert	Es ist das harmonische Mittel aus Sensitivität und Spezifität.

Tabelle 39. Berechnete Bewertungsparameter der log. Regression für 3 Zeitpunkte (Quelle: Rinder, 2018).

Bewertungsparameter	Einheit	Zeitpunkte	Logistische Regression
Sensitivität	%	t ₁	91.82
		t ₂	95.60
		t ₃	94.34
Spezifität	%	t ₁	91.18
		t ₂	91.18
		t ₃	82.35
Positiver Vorhersagewert	%	t ₁	94.19
		t ₂	94.41
		t ₃	89.29
F1- Wert	%	t ₁	92.99
		t ₂	95.00
		t ₃	91.74
Korrektklassifikationsrate	%	t ₁	91.57
		t ₂	93.87
		t ₃	89.66

Die Vorhersagekraft der trainierten Modelle zu diesen Zeitpunkten wurde zusätzlich noch anhand der ROC-Kurve (Bradley, 1997) visualisiert.

Die ROC Kurve setzt die Sensitivität und Spezifität zu einem spezifischen Zeitpunkt in Beziehung zueinander und ist ein Maß für die Modellgüte. Je mehr Fläche von der Kurve eingeschlossen wird (auf Englisch „Area Under Curve“, AUC), umso besser ist die Leistung des Modells. Bei einem Wert von 1 würden alle Datenpunkte korrekt klassifiziert werden. Abbildung 60 zeigt, dass die ROC Kurve eine Fläche von 0.98 einschließen. Dies spricht dafür, dass die Klassifikationsgüte des Modells zum Zeitpunkt t₂ sehr gut war.

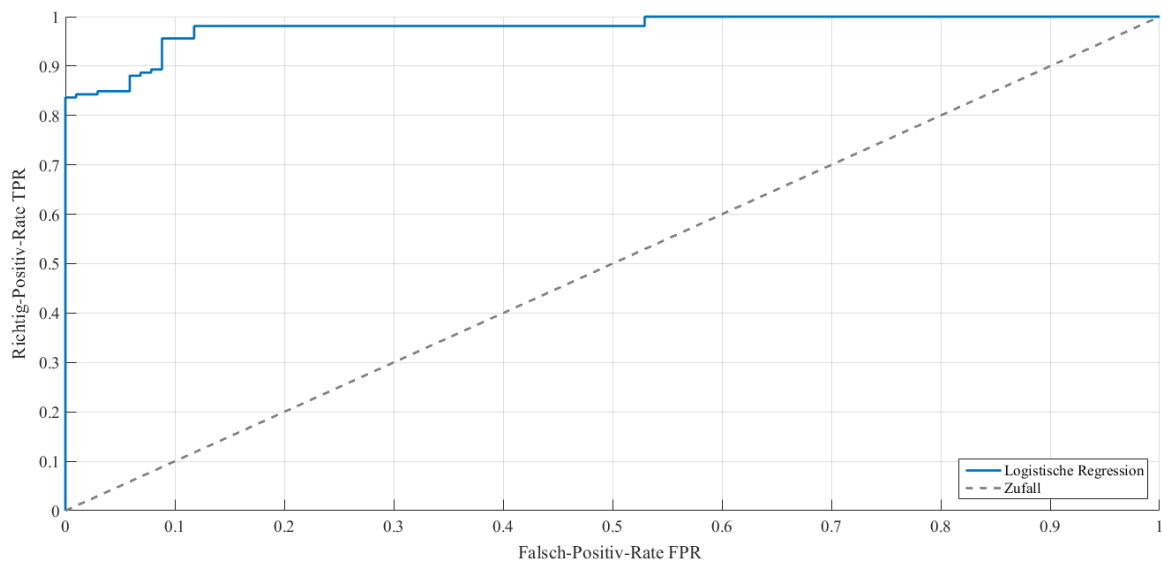


Abbildung 60. Darstellung ROC Kurve zum Zeitpunkt t_2 (Quelle: Rinder, 2018).

11.4 Diskussion

Ziel dieses Kapitels war es einen kooperativen Algorithmus für ein autonomes Fahrzeug bei der Fahrtreifenwechselankündigung zu entwickeln, welches sich so verhält, dass es vom Folgefahrer positiv wahrgenommen wird. Die Datenbasis lieferte hierzu die dritte Studie (Kap. 8). Das entwickelte Modell grenzt sich von den herkömmlichen Arbeiten zur Spurwechselprädiktion ab, da es den Aspekt der kooperativen Außenwirkung mit einbringt und nicht nur einbezieht, ob er Spurwechsel zustande gekommen ist.

In diesem Beispiel wurde mithilfe einer logistischen Regression als Klassifikator ein Modell mit einer hohen Modelgüte entwickelt. Dennoch müssen folgende Limitationen aufgezeigt werden: Die Basis für die Modellentwicklung lieferte eine Studie, die im Fahrsimulator durchgeführt wurde. Dies bedeutet, dass die Daten meist vollständig in einer hohen Qualität vorliegen und keine Störfaktoren aufweisen. Sensordaten, die aus der Realfahrt gewonnen werden, weisen zu einem gewissen Grad Ungenauigkeiten auf, zum anderen können sie entsprechend verrauscht sein, was zu Qualitätseinbußen führt. Das Rauschen kann aus verschiedenen Gründen zustande kommen wie z.B. durch entsprechend schlechte Witterungsbedingungen oder weil ein Sensor durch ein anderes Objekt verdeckt wurde. Somit wäre zu erwarten, dass die Ergebnisse im Realverkehr eine schlechtere Modelgüte aufweisen könnten. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass dieses Modell als Basis für die Entwicklung komplexer Modelle im Realverkehr dienen kann.

12 Zusammenfassende Diskussion

Dieses Kapitel beleuchtet die Forschungsfragen und bewertet die auf theoretischen Ableitungen basierenden, durchgeführten Studien inhaltlich und methodisch. Im letzten Abschnitt folgt ein Ausblick mit Anstößen, in welchen Bereichen potentiell noch weiterer Forschungsbedarf besteht.

Ziel dieser Arbeit war es, im Zuge zunehmender Automatisierung einen ersten Ansatz zu entwickeln, wie in der Transitionsphase vom manuellen zum autonomen Fahren eine Brems- und Spurwechselstrategie für ein Spurwechselszenario im Niedriggeschwindigkeitsbereich ausgelegt werden kann. Diese Strategien sollten vom menschlichen Fahrer aus Folgefahrer- und Einschererperspektive verstanden und akzeptiert werden. Gerade die Mischverkehrsphase, in der menschliche Fahrer mit autonomen Fahrzeugen interagieren, ist wesentlich für die Entwicklung von Akzeptanz und Vertrauen gegenüber dieser neuen Technologie.

Einer der großen Herausforderungen in der Entwicklung von Fahrstrategien ist es, diese an das Kommunikationsverhalten des Menschen anzupassen und sich deren Außenwirkung auf den umgebenden Verkehr bewusst zu sein. Dies inkludiert nicht nur die Analyse des Fahrverhaltens und die Ableitung für die Auslegung der Fahrstrategien, sondern vielmehr die Beachtung und Integration von psychologischen Sachverhalten, wie zum Beispiel Konstrukte der Wahrnehmung, Attribution und Kommunikation.

Im Zuge dessen wurde eine psychologische Herangehensweise gewählt und eine Methode aufgezeigt, um diese in einen technischen Kontext zu übersetzen. Die Arbeit stellt somit eine Ergänzung zu bestehenden regelbasierten interaktiven Fahrstrategien (Ahmed, 1999; Gipps 1986) dar und soll als Basis für zukünftige Weiterentwicklungen von kooperativen automatisierten Fahrerassistenzsystemen dienen.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit wurde dabei vor allem auf das menschliche Kooperationsverhalten gelegt. Gerade ein Fahrstreifenwechselszenario im Niedriggeschwindigkeitsbereich stellt ein komplexes Szenario dar (Ammoun, Nashashibi, & Laurgeau, 2007), welches eine aktive Abstimmung zwischen den Interaktionspartnern erfordert.

Im Folgenden sollen die Studien zunächst kurz zusammengefasst und im Anschluss inhaltlich und methodisch bewertet werden.

1. Was bedeutet kooperatives Interagieren im Fahrstreifenwechselszenario zwischen menschlichen Verkehrsteilnehmern?

Um diese Frage zu beantworten, wurden drei Studien in einem statischen Fahrsimulator durchgeführt.

Innerhalb der Hauptstudien wurde das Fahrstreifenwechselszenario aus der Perspektive des Einscherers als auch des Folgefahrers beleuchtet. Ziel war es, für dieses Szenario zu objektivieren, was Kooperationsbereitschaft auf Fahrparameterebene zwischen menschlichen Fahrern übersetzt, bedeutet. Zusätzlich wurde die Eindeutigkeit erhoben, was mit der Intensität eines Reizes gleichgesetzt wurde. Da es das Ziel war, die Ergebnisse in einen Algorithmus zu integrieren, wurde für ein subjektives Sicherheitsgefühl die Kritikalität der Situation erhoben. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Studien zunächst inhaltlich kurz zusammengefasst:

Die erste Hauptstudie betrachtete die **Einschererperspektive**. Ziel war es herauszufinden, wann ein Fahrer nach der Blinkersetzung, das Bremsverhalten des Folgefahrers als Signal wahrnahm, die Fahrspur wechseln zu können und wie die Außenwirkung des Folgefahrers hinsichtlich der oben genannten Konstrukte war. Zusätzlich dienten die Fahrdaten der ersten Hauptstudie als Basis für die zweite und dritte Hauptstudie (Kap. 7 und Kap. 8), da sie Anhaltspunkte für den Wertebereich der unabhängigen Variablen, die das Verhalten des einscherenden Fahrzeuges beschrieben, lieferten. Die Studie wurde in einem statischen Fahrsimulator des WIVW durchgeführt. Die Teilnehmer der Studie fuhren auf einer dreispurigen Fahrbahn auf der rechten Fahrspur und mussten bewerten, wie sie das Verhalten des Folgefahrers (3 UVs mit dreifacher Stufung: Verzögerung, Umfang der Geschwindigkeitsreduktion, Reaktionszeit) wahrgenommen hatten und ob sie einen Fahrstreifenwechsel durchführen würden. Die Hauptegebnisse lassen sich wie folgt festhalten: Je stärker verzögert, je mehr die Geschwindigkeit abgebaut und je schneller auf das blinkende Fahrzeug reagiert wurde, umso kooperativer wurde das einscherende Fahrzeug wahrgenommen. Diese Ergebnisse wurden durch die Fahrdaten unterstrichen.

Die Erkenntnisse der ersten Studie stimmen mit der bestehenden Literatur überein (Ellinghaus, 1986; Hölzel, 2008; Merten, 1977; Risser, 1987), die besagt, dass ein Einfädeln lassen im Gegensatz zu einem Weiterfahren oder Beschleunigen als kooperativ wahrgenommen wird. Zusätzlich können sie mit der Signalentdeckungstheorie erklärt werden (Green & Swets, 1966). Die Hauptaussage dieser Theorie besagt, dass bei Zunahme der Reizintensität, die Salienz steigt und der Reiz somit schneller entdeckt wird.

In der **zweiten Hauptstudie** wurde die **Folgefahrerperspektive** untersucht. Diesmal fuhren die Teilnehmer auf der Fahrbahnmitte und mussten das Verhalten eines einscherenden Fahrzeuges hinsichtlich seiner Außenwirkung beurteilen. Die unabhängigen Variablen (3 UVs

mit dreifacher Stufung: Blinkerstart, Verweilzeit und Spurwechseldauer) wurden basierend auf einer Vorstudie und der Literatur entsprechend gewählt. Die wichtigsten Erkenntnisse der zweiten Hauptstudie waren Folgende: Eine frühe Blinkersetzung wurde am kooperativsten und eindeutigsten wahrgenommen. Zu einem späteren Blinkzeitpunkt war es besser, entweder schnell oder langsam die Fahrbahn zu wechseln. Die mittlere Bedingung wurde am unkooperativsten wahrgenommen. Hinsichtlich der Verweilzeit wurde es als kooperativer angesehen, länger auf der eigenen Spur zu verweilen. Den Fahrdaten konnte zusätzlich entnommen werden, dass in kritisch bewerteten Situationen stärker gebremst bzw. schneller reagiert wurde, wenn sich der einsicherende Fahrer subjektiv eindeutiger verhalten hatte.

Eine **dritte Hauptstudie** wurde durchgeführt, die eine Weiterführung der zweiten Hauptstudie darstellt. Auch hier wurde die **Folgefahrerperspektive** übernommen. Es wurde untersucht, welche weiteren Schritte ein menschlicher Fahrer unternehmen könnte, wenn ihm, trotz Blinkersetzung, kein Platz zum Einscheren gemacht wird. Somit wurde in derselben Versuchsumgebung nach einer entsprechenden Vorstudie herausgefunden, dass die meisten Fahrer sich der Fahrbahnmarkierung nähern, um ihrem Wunsch, die Fahrspur zu wechseln, Nachdruck zu verleihen. Basierend auf der Fahrdatenanalyse der ersten Hauptstudie als auch auf der Literatur wurde als UV die laterale Position und die Dauer der lateralen Positionierung bestimmt und in drei Ausprägungen experimentell geprüft. Als Nebenbedingung wurde zusätzlich die Differenzgeschwindigkeit betrachtet. Am kooperativsten wurde eine mittlere laterale Position angesehen. Eine laterale Position von 0.25 m wurde in allen Bedingungen der Dauer der Durchführung als am wenigsten kooperativ betrachtet. Bei einer lateralen Position von 0.75 m, bei der das Fahrzeug bereits die Fahrbahnmarkierung berührte, zeigte sich, dass diese als mittel kooperativ mit Tendenz zu kooperativ betrachtet wurde, sofern der Querversatz langsam durchgeführt wurde. Hinsichtlich der Differenzgeschwindigkeit gab es die Tendenz, dass eine kleine Differenzgeschwindigkeit als kooperativer wahrgenommen wurde.

Die Ergebnisse der Studien liefern eine wertvolle Ergänzung hinsichtlich der Objektivierung von Kooperationsbereitschaft im Verkehr. Die aktuelle Literatur hinsichtlich kooperativem Fahrverhalten beschreibt Kooperation nur auf qualitativer Ebene (Ellinghaus, 1986; Maag, 2004; Tasca, 2000). Für eine Auslegung eines kooperativen Fahrerassistenzsystems im Fahrstreifenwechselszenario ist es jedoch unerlässlich zu wissen, welche dahinterliegenden Parameter kooperatives Verhalten beschreiben und wie diese zu parametrieren sind. Dies konnte in drei Hauptstudien untersucht werden. In dieser Arbeit konnte demonstriert werden, dass je nach Parametrierung bestimmter Größen dieses Verhalten unterschiedlich

wahrgenommen und interpretiert wurde. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutsamkeit der Außenwirkung und die Notwendigkeit derartige Aspekte in Zukunft mit zu beachten.

Die Ergebnisse der zweiten und dritten Studie können aus psychologischer Sicht inhaltlich wie folgt erklärt werden: Menschen empfinden Reaktanz (Brehm, 1966) , d.h. eine innerliche Abwehrreaktion, wenn sie das Gefühl haben, in ihrer Verhaltensfreiheit eingeschränkt zu sein. Somit wurde in der zweiten Hauptstudie die Bedingung positiver erachtet, wenn früher geblinkt wurde bzw. mehr Zeit durch eine größere Verweildauer des anderen Fahrzeuges auf seiner eigenen Spur gegeben war. Dies verhielt sich ebenfalls bei der dritten Hauptstudie so, da ein mittlerer Querversatz bzw. ein starker Querversatz, der langsam durchgeführt wurde, die Absicht des Fahrers, der einscheren wollte, unterstrich, aber den Folgefahrer nicht so sehr in Bedrängnis brachte wie durch einen schnellen und starken Querversatz.

Eine verwandte Theorie, die ebenfalls zur Erklärung hinzugezogen werden kann, ist die Frustrations-Aggressions-Hypothese (Dollard et al., 1939), die besagt, dass Frustrationen aggressionsauslösend sein können. Im übertragenen Sinn würde dies bedeuten, dass, wenn sich ein Folgefahrer in irgendeiner Form durch den Einscherer bedrängt fühlt, er entsprechend negativ darauf reagieren könnte. Diese Erkenntnisse zeigten sich ebenfalls in der Aggressionsforschung im Straßenverkehr sowohl emotional (O'Brien, Shaw, Watson, & Lennon, 2012) als auch auf Verhaltensebene (Mesken, 2006; Ewert, 1994).

Auch hier kann hinsichtlich der Eindeutigkeit des Verhaltens für alle Studien als Erklärung die Signalentdeckungstheorie herangezogen werden (Green & Swets, 1966), wenn man die Eindeutigkeit des Verhaltens mit der Reizintensität gleichsetzt.

Neben diesen Erkenntnissen müssen jedoch einige Aspekte beachtet werden:

Die Stichprobe in den Studien (Kap. 6 und 8) wurde am WIVW in Würzburg durchgeführt. Hier war die Möglichkeit gegeben, aus einem externen Probandenpool zu rekrutieren. Die letzte Hauptstudie (Kap. 9) wurde in einem Fahrsimulator der BMW Group mit BMW Mitarbeitern durchgeführt, was die Frage nach der Generalisierbarkeit der Ergebnisse aufwirft.

In einer Studie über Web und Mobilanwendungen wurden Stichproben von Mitarbeitern mit denen außerhalb vom Unternehmen hinsichtlich ihres Bewertungsverhaltens verglichen (Locascio, Khurana, He, Kaye, & City, 2016). Es zeigte sich, dass nur dann signifikante Unterschiede gefunden wurden, wenn die internen Mitarbeiter Konkurrenzprodukte bewerten sollten. Dies liefert den Hinweis, dass eine Generalisierung der Ergebnisse möglich wäre. Dennoch bezog sich die Studie auf einen anderen Kontext und somit müsste die Studie ggf. noch mit Teilnehmern außerhalb des Unternehmens durchgeführt werden.

Hinsichtlich der Methodik wurde in allen drei Studien ein statischer Fahrsimulator verwendet.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Nutzung des dynamischen Fahrsimulators bzw. einer Pulk Simulation, der Test im Realverkehr oder auf einer Teststrecke. Eine Übersicht findet sich in Tabelle 40. Jede dieser Methoden bringt Vor- und Nachteile hinsichtlich der Gütekriterien (Bortz & Döring, 2006; Breuer, 2009) als auch inhaltlicher Art mit sich.

Die Wahl fiel auf den Fahrsimulator, da damit Fragestellungen auf ihren Ursache - Wirkung Zusammenhang untersuchen werden können und nachvollzogen werden kann, wie Menschen eine bestimmte Situation wahrnehmen. Zusätzlich ist hier ebenfalls die Reproduzierbarkeit gegeben.

Dies war für diese Arbeit wichtig, da sie die Basis für die Optimierung von kooperativen Fahrerassistenzsystemen bieten sollte. Der statische wurde dem dynamischen Fahrsimulator vorgezogen, weil es in den Forschungsfragen um die Kommunikation mit dem umgebenden Verkehr und die Außenwirkung ging, was einen Simulator mit Bewegungssystem nicht zwingend notwendig machte.

Andere Methoden, wie die der Teststrecke, eine Realverkehrsstudie oder Pulksimulation wurden für die in der Abschlussarbeit untersuchten Fragestellungen nicht angewandt. Die Methode der Teststrecke eignet sich eher für Fragestellungen, wenn es bereits um die Eignung eines bereits entwickelten Systems geht. Auch die Realstudie bringt eher Vorteile für die explorative Untersuchung eines Sachverhaltes zur Hypothesengenerierung. Die Pulksimulation bot zu dem Zeitpunkt nur die Möglichkeit einer Interaktion durch die Vernetzung verschiedener Rechner, was dem Realitätsanspruch der Fahrdaten, die für weitere Untersuchungen notwendig gewesen wären, nicht nachgekommen wäre. Dieser Punkt sprach zusätzlich wiederum gegen eine Realstudie, da hier eine gute Qualität der objektiven Daten nicht gewährleistet werden konnte.

Tabelle 40. Übersicht der Vor- und Nachteile verschiedener Methoden (in Anlehnung an Breuer, 2009).

Fahrsimulator	Vorteile	Nachteile
Dynamischer Fahrsimulator	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe interne Validität • Zumutbarkeit • Gute Reproduzierbarkeit • Sicherheitsaspekt • Untersuchung von Ursache-Wirkung Zusammenhängen 	<ul style="list-style-type: none"> • Niedrige externe Validität • Hohe Kosten • Gefahr der Reaktivität • Gefahr der Kinetose
Statischer Fahrsimulator	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe interne Validität • Zumutbarkeit • Gute Reproduzierbarkeit • Ökonomie • Sicherheitsaspekt • Untersuchung von Ursache-Wirkung Zusammenhängen 	<ul style="list-style-type: none"> • Niedrige externe Validität • Gefahr der Reaktivität • Gefahr der Kinetose
Pulksimulation	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe interne Validität • + Untersuchung von Interaktionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gefahr der Reaktivität

	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherheitsaspekt 	
Teststrecke	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherheitsaspekt • + Untersuchung von seriennahen Fahrerassistenzsystemen 	<ul style="list-style-type: none"> • Zumutbarkeit • Ökonomie • Gefahr der Reaktivität • Nur einfach Szenarien möglich
Realverkehr (Naturalistic Driving Studies, Feldexperimente, Field operational Tests)	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe externe Validität • Eignung für explorative Studien zur Hypothesengenerierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Zumutbarkeit • Ökonomie • Schlechte Reproduzierbarkeit • Niedrige interne Validität • Sicherheitsaspekt

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass anhand der Hauptstudien gezeigt werden konnte, was kooperatives Fahrverhalten im Fahrstreifenwechselszenario zwischen menschlichen Verkehrsteilnehmern bedeutet. Es wurde demonstriert, dass Menschen ihre Entscheidungen anhand von bestimmten Parametern festmachen und je nach Ausprägung dieser Parameter, diese unterschiedlich interpretieren und entsprechend darauf reagieren. Einzelnen Themenbereichen haben sich Autoren (Maag, 2004; Risser, 1987; Ellinghaus, 1986; Benmimoun, 2004) vor allem auf qualitativer Ebene bereits gewidmet und Verhaltensweisen identifiziert, anhand derer kooperatives oder rücksichtsloses Verhalten beschrieben werden kann. Auch Themen wie formelle und informelle Kommunikation im Straßenverkehr wurden bereits einer genaueren Betrachtung unterzogen (Argyle, 1972; Merten, 1977; Wei, Dolan, & Litkouhi, 2013; Wilde, 1976). Verhaltensweisen, die Emotionen im Verkehr auslösen, gehören auch zu den gut erforschten Bereichen, besonders der Forschungsbereich der Aggression im Straßenverkehr (Mizell et al., 1997; Tasca, 2000).

Anhand der bisherigen Forschung konnte jedoch keine Aussage auf Parameterebene gemacht werden. Dies ist jedoch notwendig für die Auslegung eines kooperativen Fahrerassistenzsystems. Ziel dieser Studien war es in einem ersten Ansatz diese Lücke zu schließen.

Im nächsten Schritt stellte sich die Frage der Übertragbarkeit menschlichen Fahrverhaltens auf die Interaktion zwischen menschlichen und automatisierten Fahrzeugen. Folgende Frage sollte hier beantwortet werden:

2. Wie wird eine auf menschlichem Fahrverhalten basierende kooperative Fahrstrategie im Vergleich zu einer herkömmlichen Strategie bewertet und in Bezug auf die Interaktion mit einem automatisierten Fahrzeug beurteilt?

Um diese Frage zu beantworten, wurde in Form von Evaluationsstudien die Ergebnisse, die in den Hauptstudien am kooperativsten bewertet wurde, genutzt, um das bestehende Folge - und Fahrstreifenwechselmodell in der Verkehrssimulation PELOPS zu erweitern und dem

ursprünglichen entgegenzustellen. Im Zuge dessen wurden in einem statischen Fahrsimulator zwei Studien durchgeführt.

In der **Evaluationsstudie Spurwechselstrategie** wurden im ersten Schritt in einer Vorstudie die Wünsche gegenüber automatisierten Fahrzeugen erfragt. Es zeigte sich u.a., dass es den menschlichen Fahrern tendenziell wichtig erscheint, die Intention des automatisierten Fahrzeuges verstehen zu können und dass dieses situationsangepasst, dem menschlichen Fahrverhalten ähnlich, fährt. Ihnen war dabei vor allem wichtig, dass der Verkehrsfluss dadurch nicht behindert wurde. Vergleichbar mit den Situationen in den Hauptstudien, sind die Teilnehmer auf einer dreispurigen Fahrbahn gefahren.

In der ersten Evaluationsstudie Spurwechselstrategie ging es darum, die neu entwickelte mit der herkömmlichen Spurwechselstrategie TRM zu vergleichen. Bei dem Vergleich zeigte sich, dass die neue Strategie kooperativer und eindeutiger bewertet wurde als die ursprüngliche Spurwechselstrategie TRM. Auch in der **Evaluationsstudie Bremsstrategie**, in der die Probanden (entsprechend der Studie in Kap. 7 und Kap. 8) einen Fahrstreifenwechsel ankündigen und sich entscheiden mussten, wie sie es hinsichtlich seiner Außenwirkungen beurteilen würden, wurde die neue Bremsstrategie als kooperativer und eindeutiger bewertet als die Ursprungsstrategie.

Die Studien in der Evaluationsphase geben Hinweise darauf, dass es durchaus wichtig ist, bei der Entwicklung eines Algorithmus im Mischverkehrsszenario die menschliche Wahrnehmung und informelle Kommunikation mit einzubeziehen. Versuche, bei denen Teilnehmer aus der Außenperspektive entwickelte Trajektorien bzw. Fahrverhalten auf Parameterebene bewerteten, gibt es in der Interaktionsforschung zwischen Fußgängern und Autofahrern (Beggiato et al., 2016). Auch die Bewertung von Trajektorien und Fahrstilen gibt es im Bereich der Komfortforschung aus Insassenperspektive. Hier geht es darum, wie Menschen in der Zukunft gefahren werden möchten (Ammon, 2013; Bellem, Schönenberg, Krems, & Schrauf, 2016; Festner, Eicher, & Schramm, 2017; Scherer, Schubert, Dettmann, Hartwich, Bullinger, 2016; Scherer et al., 2015). Auch das Kooperationsverhalten zwischen Insasse und autonomes Fahrzeug wurde in der Literatur beleuchtet (Ammoun, Nashashibi, & Laurgeau, 2007; Li, Wang, & Kim, 2005; Walch et al., 2016).

Anhand der bisherigen Forschung konnte jedoch keine Aussage für eine Auslegung einer Fahrstrategie im Bereich des automatisierten Fahrens hinsichtlich der Interaktion mit dem umgebenden Verkehr auf der Autobahn gemacht werden. Es fehlte die Verknüpfung der Themenbereiche miteinander und die Verhaltensbetrachtung auf Parameterebene, was notwendig ist, um erste Gestaltungshinweise für die Entwicklung von Algorithmen für

Fahrstrategien zu geben. Die in dieser Arbeit durchgeführten Evaluationsstudien (Kap. 9) basierend auf kooperativ bewertetem menschlichem Fahrverhalten sind ein erster Indikator, dass die Einbeziehung der subjektiven Wahrnehmung durchaus sinnvoll sein könnte.

Dennoch gibt es methodische Aspekte, die kurz beleuchtet werden sollten.

Ein wichtiger Diskussionspunkt stellt, wie bereits bei der letzten Hauptstudie (Kap.8) angemerkt, die Stichprobenzusammensetzung dar. Diese bestand bei beiden Studien nicht nur aus BMW internen Mitarbeitern, sondern war überwiegend männlich und hatte ein niedriges Durchschnittsalter. Studien bzgl. des Einflusses von Alter und Geschlecht zeigten gemischte Ergebnisse. Kyriakidis et al. (2015) führten eine quantitative Fragebogenstudie mit über 5000 Teilnehmern durch. Es zeigte sich bei Männern, dass sie weder besorgt in Bezug auf die Interaktion mit autonomen Fahrzeugen waren und sie mehr Geld dafür ausgeben würden als Frauen. Czaja et al. (2006) zeigten, dass ältere Frauen besorgter bezüglich der Benutzung autonomer Fahrzeuge waren als jüngere Frauen. Hulse, Xie und Galea (2018) fanden heraus, dass Männer und allgemein jüngere Teilnehmer eine höhere Akzeptanz zeigten. Somit wäre es wichtig weitere Studien mit einer heterogeneren Stichprobe durchzuführen, um allgemeine Schlussfolgerungen bzgl. der Interaktion mit autonomen Fahrzeugen machen zu können.

Ein weiterer Diskussionspunkt stellt, wie in den Hauptstudien bereits erwähnt, der Fahrsimulator dar. Aus ökonomischen Gründen wurde wiederum ein statischer Fahrsimulator genutzt, um die Fragestellung zu untersuchen. Andere Möglichkeiten, die sich gut eignen würden, um eine derartige Fragestellung zu beantworten stellen Wizard of Oz Fahrzeuge dar. Habibovic et al. (2016) untersuchte u.a. die Interaktion zwischen menschlichen Fahrern und automatisierten Fahrzeugen im Realverkehr mithilfe von einem Wizard of Oz Fahrzeug, allerdings aus Insassenperspektive. Diese Methode schien für derartige Fragestellungen geeignet zu sein. Ebenso untersuchten Rothenbücher et. al (2016) die Interaktion zwischen Fußgängern und einem Wizard of Oz Fahrzeug bei einem Zebraübergang, um die Interaktion zwischen den Interaktionspartnern besser zu verstehen. In diesen Studien erwies sich diese Methodik als geeignet, somit wäre ein interessanter Ansatz auch neue Fahrstrategien zwischen menschlichen und automatisierten Fahrzeugen mithilfe von Wizard of Oz Fahrzeugen zu beleuchten.

Im letzten Schritt wurde in einem **Exkurs auf maschinelles Lernen** (Kap. 11) eingegangen, um aufzuzeigen wie eine Weiterverarbeitung der Daten basierend auf Erkenntnissen der Studie gestaltet werden könnte. Als Ziel sollte die Entwicklung eines kooperativen Algorithmus für ein autonomes Fahrzeug bei der Fahrtreifenwechselankündigung aufgezeigt werden, welches sich so verhalten sollte, dass er vom Folgefahrer positiv wahrgenommen wird.

Die Methode des maschinellen Lernens ist nur für bestimmte Fragestellungen geeignet:

Mithilfe von maschinellem Lernen ist es nicht möglich Erkenntnisse über Ursache – Wirkung Zusammenhänge zu generieren, wie z.B. wie Menschen Situationen wahrnehmen und bewerten (Ben-David & Shalev-Shwartz, 2014). Dies benötigt qualitative und quantitative Forschungsmethoden wie beispielsweise die Durchführung von Studien im Fahrsimulator, um Rückschlüsse auf die subjektive Wahrnehmung des Menschen ziehen zu können.

Maschinelles Lernen eignet sich jedoch für große Datenmengen, wenn Expertenmeinungen vorliegen (überwachtes Lernen), die Klassifikation von Situationen aber zu aufwendig/komplex wäre. Menschen können wie in den durchgeführten Studien am Situationen subjektiv beurteilen und klassifizieren, dennoch umfasst ihr Urteil nur eine von unendlich vielen Situationen im Verkehr. Eine Klassifikation von allen möglichen Situationen wäre zu unökonomisch. Hier würde es sich mehr lohnen, basierend auf einem von Menschen gelabelten Datenset maschinelles Lernen anzuwenden, um Modelle mit einer bestimmten Vorhersagekraft zu entwickeln, die Aussagen über allgemeine Gesetzmäßigkeiten machen können (Ben-David & Shalev-Shwartz, 2014).

Maschinelles Lernen macht auch dann Sinn, wenn es eine Vielzahl von Daten gibt, zu denen es jedoch keine Expertenmeinung über dahinterliegende Zusammenhänge gibt. Hier könnte unüberwachtes Lernen angewandt werden, um Zusammenhänge zu finden. Gerade aber das unüberwachte Lernen lässt jedoch keine Rückschlüsse zu, warum das System auf eine bestimmte Art und Weise reagiert hat, was ein gewisses Risikopotential birgt, gerade wenn es zu einem Unfall kommen sollte.

Somit lässt sich zusammenfassen, dass psychologische Studien notwendig sind, wenn es darum geht, die Beweggründe des Menschen besser zu verstehen. Maschinelles Lernen macht Sinn, wenn eine große Anzahl an Situationen klassifiziert werden soll. Hier ist die Methode des überwachten Lernens zu bevorzugen, in der basierend auf Expertenmeinungen, Generalisierungen über bestimmte Gesetzmäßigkeiten gemacht werden können und somit das Verhalten des Fahrzeuges nachvollzogen werden kann. Im Folgenden Kapitel sollen kurz potentielle Forschungsfelder beleuchtet werden, welche inhaltlich eng mit dem Thema der Arbeit verknüpft sind.

13 Ausblick

Die Arbeit leistet einen wichtigen Beitrag im Bereich der Interaktion zwischen menschlichen Fahrern und automatisierten Fahrzeugen. Dennoch besteht in diesem Gebiet noch ein großer Forschungsbedarf. Dieser lässt sich in verschiedene Teilbereiche differenzieren:

1. Untersuchung hinsichtlich anderer Formen der impliziten Kommunikation im Fahrstreifenwechselszenario.

Diese Arbeit hat sich ausschließlich mit der Kommunikation über das Fahrverhalten bzw. formeller Zeichen konzentriert. Wie in Kap. 2.3.2 beschrieben, wäre auch Kommunikation über informelle Zeichen wie Blicke, Gestik und Mimik (Risser, 1987) denkbar. So müsste untersucht werden, ob die Außenwahrnehmung und Kommunikation durch zusätzliche informelle Zeichen beispielsweise in Form visueller Zeichen signifikant verbessert werden könnte. Beispiele hierfür finden sich im Bereich der Kommunikation zwischen Fußgänger und autonomen Fahrzeugen, in denen über LED Lichter (Lagström & Lundgren, 2015) oder Projektoren mit dem Fußgänger kommuniziert wird (Daimler AG, 2018).

2. Untersuchung weiterer Einflussfaktoren auf kooperatives Verhalten beim Fahrstreifenwechsel

Es ist bereits bekannt, dass es Einflussfaktoren gibt, die das Interaktionsverhalten beeinflussen können wie die Spurwechselrichtung oder auch Fahrzeuggröße. So gelten Fahrer stärker motorisierter Fahrzeuge als rücksichtsloser (Davies, 2009). Zimmermann et al. (2015) fanden heraus, dass ein Spurwechsel nach rechts als kooperativer wahrgenommen wurde als nach links. Personenbezogene Faktoren wie Alter, Geschlecht oder Risikoverhalten (Hagen, Schulze, Schlag, 2012; Schleinitz et al., 2015) haben ebenfalls Einfluss auf kooperatives Verhalten (siehe hierzu auch Kap. 2.1.2). So fahren Frauen sicherheitsorientierter als Männer (Özkan & Lajunen, 2006). Wie sich diese Faktoren auf das Fahrverhalten auf Parameterebene auswirken können, müsste dennoch im Zuge der Automatisierung genauer betrachtet werden.

3. Ausweitung auf weitere Anwendungsszenarien

In dieser Arbeit wurde der Fokus nur auf ein Anwendungsszenario: eine Fahrstreifenwechselsituation im Niedriggeschwindigkeitsbereich gelegt, die eine Interaktion zwischen Einscherer und Folgefahrer beleuchtete.

Dieses Szenario stellt nur eines von vielen Fahrstreifenwechselszenarien dar. Wie in Kap. 2.4.3. aufgezeigt gibt es Typen an Fahrstreifenwechselszenarien (Bascunana, 1995; Dagli & Reichardt, 2002, Fastenmeier et al., 2001; Olsen, 2003) beispielsweise ein Fahrstreifenwechsel von einer Fahrspur mit einer höheren auf eine Fahrspur mit einer niedrigeren Geschwindigkeit oder bei einer Ein- oder Ausfahrt. Diese könnten in zukünftigen Studien einer näheren Betrachtung unterzogen werden.

Neben dem Fahrstreifenwechselszenario auf der Autobahn gibt es noch weitere Situationen, die eine Kooperation zwischen Interaktionspartnern erfordern.

Diesbezüglich wurden bereits Szenarienkataloge erstellt, die nach unterschiedlichen Gesichtspunkten gegliedert wurden. Bengler, Pütz, Purucker, Götze und Färber (2015) unterscheiden bei Fahrerassistenzsysteme drei Charakteristika: Eigenschaften des Fahrerassistenzsystems (z.B. Einsatzbereich, Zuverlässigkeit usw.), Assistenztyp (Navigation, Stabilisierung, Manöverebene) und Inanspruchnahme der Leistungen des Nutzers. Wachenfeld, et al. (2014) definieren spezielle Anwendungsszenarien für das autonome Fahren und unterscheiden dabei nach Kriterien wie Art der Beförderung, Höchstgeschwindigkeit, Eingriffsmöglichkeiten usw. Einen möglichen Ansatz, der speziell auf die Interaktion zwischen menschlichen Verkehrsteilnehmern und automatisierten Fahrzeugen sinnvoll ist, liefern Fuest et al. (2018). Dabei werden die Anwendungsszenarien anhand von den Merkmalen: Vorfahrt, Intention und Geschwindigkeit des autonomen Fahrzeuges und des menschlichen Verkehrsteilnehmers, Fahrertyp (Fahrradfahrer, Autofahrer usw.), longitudinale und laterale Distanz, Aufmerksamkeit und Sichtbeeinträchtigung des menschlichen Verkehrsteilnehmers, Fahrtrichtung und Perspektive des autonomen Fahrzeuges gegliedert. Auch das Projekt InterACT (InterACT, 2017) beschäftigt sich damit wie die Interaktion zwischen Verkehrsteilnehmern und autonomen Fahrzeugen gestaltet werden sollten. In diesem Projekt wurde ebenfalls ein Szenarienkatalog definiert. Die wichtigsten Gliederungspunkte beziehen sich hier auf die geplanten Trajektorien des autonomen Fahrzeuges, Straßenbeschaffenheit, Topologie Anzahl und Intention der Interaktionspartner, Intention usw. (Wilbrink et al., 2016). Diese Ansätze liefern Orientierungspunkte und können als Basis für die Auswahl und Betrachtung weiterer Szenarien je nach Forschungsschwerpunkt dienen. Eine Ausweitung auf andere Anwendungsszenarien impliziert auch die Auseinandersetzung mit verschiedenen Typen von Verkehrsteilnehmern.

4. Interaktionen mit verschiedenen Arten von Verkehrsteilnehmern

In dieser Arbeit wurde der Fokus auf die Autobahn und somit auf einen eingeschränkten Teilnehmerkreis gelegt. Eine Betrachtung weitere Szenarien in der Stadt erfordert die Untersuchung der Interaktion mit weiteren Verkehrsteilnehmer wie Fußgängern (Beggiato & Krems, 2013; Schmidt & Färber, 2009; Witzlack et al., 2016)., wobei hier verschiedene Altersgruppen mit unterschiedlichen Bedürfnissen beachtet werden müssen, wie z.B. Kinder (Limbourg, Flade, & Schönharting, 2000), ältere Personen (Schlag, 2008), Radfahrer (Schleinitz et al., 2015; Rothenbücher et al., 2016) oder Motorradfahrer.

So zeigte Schlag (2008) Problemfelder älterer Fahrer hinsichtlich ihrer Wahrnehmung, Kognition und Handlung auf. In einer Studie von Lobjois und Cavallo (2007) hatten ältere Menschen im Vergleich zu jüngeren Menschen Schwierigkeiten bei der Überquerung von Straßen Geschwindigkeiten sich nähernder Fahrzeuge einzuschätzen. Kindern unter 8 Jahren dagegen fehlt die Fähigkeit der Antizipation von Gefahren (Limbourg, Flade, & Schönharting, 2000), was eine Interaktion im Verkehr mit autonomen Fahrzeugen besonders riskant macht. Gerade hier sind weitere Studien erforderlich, wie sich die einzelnen Verkehrsteilnehmer voneinander unterscheiden und worauf zukünftig in der Interaktion mit diesen geachtet werden muss. Dies ist besonders wichtig, um Unfälle und Kollisionen zu vermeiden (Beggiato et al., 2016) und eine Schlüsselkomponente, wenn es darum geht, dass Menschen Vertrauen und Akzeptanz entwickeln sollen (Banks & Stanton, 2016). Darauf basierend können, wie in dieser Arbeit, Ableitungen für die Interaktion mit automatisierten Fahrzeugen gemacht werden (Gohl & Schneemann, 2015; Witzlack et al., 2016).

5. Untersuchung der kulturellen Einflussfaktoren auf die informelle Kommunikation im Straßenverkehr und der Bedeutung für das autonome Fahren

Kultur ist ein wichtiger Einflussfaktor, weil er definiert, wie Menschen denken und handeln und welchen sozialen Normen sie folgen. Kulturelle Unterschiede existieren nicht nur zwischen Ländern (Lindgren, Chen, Jordan, & Zhang, 2008), sondern können schon zwischen Städten variieren (Björklund & Åberg, 2005). Forscher (Nordfjærn, Jrgensen, & Rundmo, 2011; Nordfjærn, Şimşekoğlu, & Rundmo, 2014; Wallén Warner, Özkan, & Lajunen, 2009) haben sich bereits bzgl. kultureller Unterschiede im Straßenverkehr auseinandergesetzt. Nach Geertz (1973) findet Denken nicht nur im Kopf statt, sondern äußert sich in Form von Symbolen, sei es durch Gestik oder auf Verhaltensebene. Dies kann nach Nordfjærn et al. (2014) ebenfalls auf den Verkehrskontext übertragen werden. Nach den Autoren wird wie bei der Sprache davon ausgegangen, dass die Kommunikation über Symbole variiert und dass verschiedene Länder ihre eigene Art der Kommunikation durch die Verwendung von Symbolen im Verkehr entwickelt haben. Das bedeutet, dass länderspezifisch eine Reihe von Symbolen (z.B. Verkehrszeichen, Geräusche und Vorschriften) auf eine bestimmte Art und Weise benutzt und interpretiert werden, sei es in Form von beispielsweise Geräuschen, die Gefahren im Straßenverkehr signalisieren. In diesem Zusammenhang wird auch von „Straßenverkehrskultur“ gesprochen (Nordfjærn, Imekolu, & Rundmo, 2012; Rundmo, Granskaya, & Klempe, 2012). Dies inkludiert, dass länderspezifisch bestimmte informelle Regeln existieren, die in dem jeweiligen Kulturraum entsprechend akzeptiert werden. Im Zuge

zunehmender Automatisierung wäre es daher wichtig, sich der Unterschiede zwischen den Ländern bewusst zu sein und ggf. länderspezifische Auslegung der Fahrstrategie vorzunehmen.

Neale & Dingus (1998) fassen die Kernherausforderung, vor der wir stehen wie folgt zusammen *“The hardest problems associated with an Automated Highway System (AHS) ... are ‘soft’; that is, there are human factors issues of safety, usability, and acceptance, as well as institutional issues. These are problems that are many times more difficult to overcome and must be overcome, largely, in parallel with the traditionally ‘hard’ technological issues”* (S.111)

Um die aktuelle Herausforderung der Interaktion im Mischverkehr in der Transitionsphase zu meistern, müssen ganzheitliche Lösungsansätze herangezogen werden, die das Wissen verschiedener Disziplinen vereinen. Diese Arbeit möchte einen Beitrag liefern, wie mit einer derartigen Herausforderung umgegangen werden kann und zeigen, dass die Integration der menschlichen subjektiven Wahrnehmung, Attribution und Kommunikation einen vielversprechenden Ansatz hierfür darstellt.

14 Literaturverzeichnis

- Adams, L. (1994). *Review of the literature on obstacle avoidance maneuvers: Braking versus steering*. Michigan. <https://doi.org/10.1186/1757-1626-2-9342.7>.
- Adebisi, O., & Sama, G. N. (1989). Influence of Stopped Delay on Driver Gap Acceptance Behavior. *Journal of Transportation Engineering*, 115(3), 305–315. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1989\)115:3\(305\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1989)115:3(305))
- AUDI AG. (2019). Audi side assist - Audi Technology Portal. Abgerufen 26. April 2019, von <https://www.audi-technology-portal.de/de/elektrik-elektronik/fahrerassistenzsysteme/audi-side-assist>
- AUDI AG (2018). Adaptive cruise control mit Stop & Go-Funktion. (2018, 11.Februar). Abgerufen von <https://www.audi-technology-portal.de/de/elektrik-elektronik/fahrerassistenzsysteme/adaptive-cruise-control-mit-stop-go-funktion>
- Ahmed, K. I. (1999). *Modeling Drivers' Acceleration and Lane Changing Behavior* (Dissertation). Massachusetts Institute of Technology.
- Akçelik, R. (2007). *A review of gap-acceptance capacity models*. In Conference: 29th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR 2007). Abgerufen von http://www.sidrasolutions.com/documents/akcelik_gapacceptancecapacitymodels_caitr2007.pdf
- Albert, M., Lange, A., Schmidt, A., Wimmer, M., & Bengler, K. (2015). Automated Driving – Assessment of Interaction Concepts Under Real Driving Conditions. *Procedia Manufacturing*, 3(Ahfe), 2832–2839. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.767>
- Alexander, J., Barham, P., & Black, I. (2002). Factors influencing the probability of an incident at a junction: Results from an interactive driving simulator. *Accident Analysis and Prevention*, 34(6), 779–792. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(01\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(01)00078-1)
- Alm, H., & Nilsson, L. (1995). The effects of a mobile telephone task on driver behaviour in a car following situation. *Accident Analysis & Prevention*, 27(5), 707–715. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(95\)00026-V](https://doi.org/10.1016/0001-4575(95)00026-V)
- Ammon, D. (2013). Systemtechnische Überlegungen auf dem Weg zum automatisierten Fahren: Was bleibt und was muss sich ändern, wenn der Algorithmus statt des Fahrers fährt? In 7. VDI-Tagung Der Fahrer im 21. Jahrhundert: Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit, Braunschweig, 5. und 6. November 2013; 2013 (S. 201–212). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Ammoun, S., Nashashibi, F., & Laugeau, C. (2007). An analysis of the lane changing manoeuvre on roads: the contribution of inter-vehicle cooperation via communication. In 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (S. 1095–1100). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IVS.2007.4290263>
- Arbuthnott, D. W. (1980). Effects of noise and perceptual style on reaction to a simulated driving emergency. *Canadian Journal of Behavioural Science/Revue ...*, 12(1), 78–86. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1037/h0081050>
- Argyle, M. (1972). Non-verbal communication in human social interaction. In R. A. Hinde, *Non-verbal communication*. Oxford, England: Cambridge U. Press.
- Ashworth, R., & Bottom, C. G. (1977). Some Observations Of Driver Gap-Acceptance Behaviour At A Priority Intersection. *Traffic Engineering and Control*.
- Auto Club Europa. (2008). Reviere der Blinkmuffel. (2018,15.Februar). Abgerufen von http://www.ace-online.de/fileadmin/user_uploads/Der_Club/Dokumente/10.07.2008_Grafik_Blinkmuffel_1.pdf
- Axelrod, R. (1984). *The Evolution of Cooperation*. New York: Basic Books.
- Ayres, T. J., Li, L., Schleuning, D., & Young, D. (2001). Preferred time-headway of highway drivers. *ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585)*, i(1980), 827–830. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2001.948767>
- Balliet, D., & Van Lange, P. A. M. (2013). Trust, conflict, and cooperation: A meta-analysis. *Psychological Bulletin*, 139(5), 1090–1112. <https://doi.org/10.1037/a0030939>
- Banks, V. A., & Stanton, N. A. (2016). Keep the driver in control: Automating automobiles of the future. *Applied Ergonomics*, 53, 389–395. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.06.020>
- Barceló, J., & Codina, E. (2005). Microscopic traffic simulation: A tool for the design, analysis and evaluation of intelligent transport systems. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*.
- Bartsch, A., & Hübner, S. (2004). *Emotionale Kommunikation – ein integratives Modell*. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- Barrett, G. V. (1968). Feasibility of Studying Driver Reaction to Sudden Pedestrian Emergencies in an Automobile Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 10(1), 19–26. <https://doi.org/10.1177/001872086801000104>
- Bascunana, J. L. . (1995). *Analysis of Lane Change Crash Avoidance*. SAE Technical Paper Series 951895. Warrendale. <https://doi.org/10.4271/951895>
- Baumann, M., Steenken, R., Kassner, A., Weber, L., & Lüdtke, A. (2011). Effects of Situational Characteristics on Drivers' Merging into Freeway Traffic. *Human Modelling in Assisted Transportation*, 327–333. <https://doi.org/10.1007/978-88-470-1821-1>
- Beene, R., & Levin, A. (2017). A Truck Backed Up and This New Self-Driving Shuttle Froze. Abgerufen am November 27, 2017, unter <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-11-10/vegas-fender-bender-highlights-risks-of-sharing-road-with-robots>
- Beggiato, M., & Krems, J. F. (2013). Sequence analysis of glance patterns to predict lane changes on urban arterial roads. 6. Tagung Fahrerassistenz. Abgerufen von <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1187197/1187197.pdf>
- Beggiato, M., Witzlack, C., & Krems, J. F. (2016). Gap Acceptance and Time - To - Arrival Estimates as Basis for Informal Communication between Pedestrians and Vehicles. In *Proceedings of the 9th ACM International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI '17)* (S. 50–57). Oldenburg, Germany.
- Bellem, H., Schönenberg, T., Schrauf, M., & Krems, J. F. (2015). Was macht automatisiertes Fahren komfortabel? In *AUTOREG 2015, 7. VDI/VDE-Fachtagung Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren, Auf dem Weg zum automatisierten Fahren, Baden-Baden, DE, 9. - 10. Jun, 2015*. (S. 181–188). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Bellem, H., Schönenberg, T., Krems, J. F., & Schrauf, M. (2016). Objective metrics of comfort: Developing a driving style for highly automated vehicles. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 41, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.05.005>
- Bengler, K., Zimmermann, M., Bortot, D., Kienle, M., & Damböck, D. (2012). Interaction Principles for Cooperative Human-Machine Systems. *IT - Information Technology*, 54(4), 157–164. <https://doi.org/10.1524/itit.2012.0680>
- Bengler, K., Dietmayer, K., Farber, B., Maurer, M., Stiller, C., & Winner, H. (2014). Three decades of driver assistance systems: Review and future perspectives. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 6(4), 6–22. <https://doi.org/10.1109/IMITS.2014.2336271>
- Bengler, K., Pütz, A., Purucker, C., Götze, M., & Färber, B. (2015). Das UR : BAN Assistenzszenario als Konstrukt für die Entwicklung und Bewertung integrierter Fahrerassistenzsysteme. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaften*, 69, 65–70.
- Ben-David, S., & Shalev-Shwartz, S. (2014). *Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms*. *Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107298019>
- Benmimoun, A., Neunzig, D., & Maag, C. (2004). Effizienzsteigerung durch professionelles/partnerschaftliches Verhalten im Straßenverkehr. In *FAT-Schriftenreihe 181*. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.
- Björklund, G. M., & Åberg, L. (2005). Driver behaviour in intersections: Formal and informal traffic rules. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(3), 239–253. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2005.04.006>
- Bliersbach, G. (1978). Interaktionsmuster und Interaktionskonflikte beim Autofahren. In *Gruppendynamik, Band 9* (S. 238–248).
- BMW AG (2016). Technische Qualifizierung. Produktinformation. G11/G12 Gesamtfahrzeug. BMW Group.
- BMW AG. (2018). BMW Connected Drive: Spurverlassenswarnung. (2018, 11.Februar) Abgerufen von

- <https://www.bmw.de/de/topics/faszination-bmw/connected-drive/driver-assistance.html#>
- Bortz, J. (2005). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (6. Auflage). Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Bortz, J., & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. Text. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-33306-7>
- Bouroche, M., Hughes, B., & Cahill, V. (2006). Real-time coordination of autonomous vehicles. *2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 1232–1239. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2006.1707391>
- Brackstone, M., McDonald, M., & Wu, J. (1998). Lane changing on the motorway: factors affecting its occurrence, and their implications. In *9th International Conference on Road Transport Information and Control, 1998. (Conf. Publ. No. 454)* (S. 160–164). IET. <https://doi.org/10.1049/cp:19980175>
- Bradley, A. (1997). The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. *Pattern Recognition*, 30(7), 1145–1159. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(96\)00142-2](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(96)00142-2)
- Brehm, J. W. (1966). *A theory of psychological reactance*. New York. <https://doi.org/10.1002/hrdq.20027>
- Breuer, J. (2009). Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 55–68). Wiesbaden: Vieweg+Teubner. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9977-4_7
- Bröckerhoff, M. (2010). *PELOPS White Paper*. Aachen. Abgerufen von <https://www.fka.de/images/pelops-whitepaper.pdf>
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2017). *Maßnahmenplan der Bundesregierung zum Bericht der Ethik-Kommission Automatisiertes und Vernetztes Fahren (Ethik-Regeln für Fahrcomputer)* (Vol. 18). Abgerufen von <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/135/1813500.pdf>
- Casley, S., Jardim, A., & Quartulli, A. (2017). A study of public acceptance of autonomous cars. Abgerufen von https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-043013-155601/unrestricted/A_Study_of_Public_Acceptance_of_Autonomous_Cars.pdf
- Chandler, R. E., Herman, R., & W., M. E. (1958). Traffic Dynamics: Studies in Car Following. *Operations Research*, 6(2), 165–184.
- Chen, J. (2010). *Fahrerassistenzsystem zum autonomen Spurwechsel*. (Dissertation). RWTH Aachen.
- Cheng, S. Y., & Trivedi, M. M. (2006). Turn-Intent Analysis Using Body Pose for Intelligent Driver Assistance. *IEEE Pervasive Computing*, 5(4), 28–37. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2006.88>
- Choudhury, C., Rao, A., Lee, G., Ben-Akiva, M., & Toledo, T. (2007). Modeling cooperative lane changing and forced merging behavior. In *86th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington, DC.
- Chovan, J., Tijerina, L., Alexander, G., & Hendricks, D. (1994). *Examination of Lane Change Crashes and Potential IVHS Countermeasures*. Cambridge. Abgerufen von <https://ntl.bts.gov/lib/16000/16600/16677/PB2000104485.pdf>
- Christens, F., & Huang, Q. (2008). Das Fahrermodell im Verkehrsflussumulationsprogramm PELOPS - Modellierung und Applikationsmöglichkeiten. *Fahrermodellierung in Wissenschaft Und Wirtschaft : 2. Berliner Fachtagung Fahrermodellierung*, 19. - 20. Juni 2008, 128–144. Abgerufen von https://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/102838/1/8ch0065_Paper_Fahrermodellierung.pdf
- Cialdini, R. B., & Trost, M. R. (1998). Social influence: social norms, conformity, and compliance. In *The handbook of social psychology* (S. 151–192).
- Czaja, S. J., Charness, N., Fisk, A. D., Hertzog, C., Nair, S. N., Rogers, W. A., & Sharit, J. (2006). Factors predicting the use of technology: Findings from the Center for Research and Education on Aging and Technology Enhancement (CREATE). *Psychology and Aging*, 21(2), 333–352. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.21.2.333>
- Dagli, I., & Reichardt, D. (2002). Motivation-based approach to behavior prediction. *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 227–233. <https://doi.org/10.1109/IVS.2002.1187956>
- Dagli, I., Brost, M., & Breuel, G. (2003). Action recognition and prediction for driver assistance systems using dynamic belief networks. *Agent Technologies, Infrastructures, Tools, and Applications for E-Services*, 179–194. https://doi.org/10.1007/3-540-36559-1_15
- Dagli, I., Breuel, G., Schittenhelm, H., & Schanz, A. (2004). Cutting-in vehicle recognition for ACC systems towards feasible situation analysis methodologies. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2004*, 925–930. <https://doi.org/10.1109/IVS.2004.1336509>
- Daimler AG (2015). Der nächste Schritt auf dem Weg zum autonomen Fahren: Die neue E-Klasse - auf der Überholspur mit dem Aktiven Spurwechsel-Assistenten. (2018,11.Februar), Abgerufen von <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Der-naechste-%0ASchritt-auf-dem-Weg-zum-autonomen-Fahren-Die-neue-E-Klasse---aufder-%0AUeberholspur-mit-dem-Aktiven-Spurwechsel-Assistenten.xhtml?oid=%0A9919909>
- Dambock, D., Weissgerber, T., Kienle, M., & Bengler, K. (2013). Requirements for cooperative vehicle guidance. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, (Itsc)*, 1656–1661. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2013.6728467>
- Davies, G. M. (2009). Estimating the speed of vehicles: the influence of stereotypes, (October 2014), 37–41. <https://doi.org/10.1080/10683160802203971>
- Dawes, J. (2018). Do Data Characteristics Change According to the Number of Scale Points Used? An Experiment Using 5-Point, 7-Point and 10-Point Scales. *International Journal of Market Research*, 50(1), 61–104. <https://doi.org/10.1177/147078530805000106>
- De Winter, J., Van Leeuwen, P., & Happee, R. (2012). Advantages and Disadvantages of Driving Simulators : A Discussion. *Proceedings of Measuring Behavior, 2012*, 47–50.
- Deutsch, M. (1958). Trust and suspicion. *Journal of Conflict Resolution*, 2(4), 265–279. <https://doi.org/10.1177/002200275800200401>
- Deutsch. (2011). Cooperation and Competition. In P. Coleman (Hrsg.), *Conflict, Interdependence, and Justice The Intellectual Legacy of Morton Deutsch* (Band 32, S. 23–40). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9994-8_2
- Dogan, U., Edelbrunner, H., & Iossifidis, I. (2008). Towards a Driver Model: Preliminary Study of Lane Change Behavior. *2008 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 931–937. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2008.4732700>
- Dollard, J., Doob, L. W., Miller, N. E., Mowrer, O. H., & Sears, R. R. (1939). *Frustration and Aggression*. New Haven, CT: US: Yale University Press. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1037/10022-000>
- Donges, E. (2009). Fahrerverhaltensmodelle. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 15–23). Wiesbaden: Vieweg+Teubner. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9977-4_3
- Doshi, A., & Trivedi, M. M. (2009). On the roles of eye gaze and head dynamics in predicting driver's intent to change lanes. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 10(3), 453–462. <https://doi.org/10.1109/TITS.2009.2026675>
- Druitt, S. (1998). An Introduction to Microsimulation. *Traffic Engineering and Control*, 39(9), 480–483.
- Duden. (2018.01.Januar). Duden online - die deutsche Rechtschreibung. Kooperation. Abgerufen von <https://www.duden.de/rechtschreibung/Kooperation>
- Duden. (2018.01.Januar). Duden online - die deutsche Rechtschreibung. Kommunikation. Abgerufen von <https://www.duden.de/rechtschreibung/Kommunikation>
- Düring, M. (2006). Fahrzeugübergreifendes kooperatives Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem für automatische Fahrzeuge, 32. <https://doi.org/10.1126/science.1133755>
- Ehmanns, D. (2001). Simulation model of human lane change behaviour. In *Der Fahrer im 21. Jahrhundert : Tagung Berlin, 3. und 4. Mai 2001* (S. 203–216). DI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik.
- Ehmanns, D. (2003). *Modellierung des taktischen Fahrerhaltens bei Spurwechselvorgängen*. (R. A. Schriftenreihe Automobiltechnik, ika & F. K. (fka), Eds.), *Schriftenreihe Automobiltechnik, ika, RWTH Aachen* (63rd ed.). Aachen.
- Ellinghaus, D. (1986). *Rücksichtslosigkeit und Partnerschaft. Eine sozialpsychologische Untersuchung über den Umgang unter Kraftfahrern*

- im Straßenverkehr. (Uniroyal V). Köln: IFAPLAN.
- Evans, L., & Wasieleski, P. (1983). Risky driving related to driver and vehicle characteristics. *Accident Analysis and Prevention*, 15(2), 121–136. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(83\)90068-4](https://doi.org/10.1016/0001-4575(83)90068-4)
- Evans, L. (1991). *Traffic Safety and the Driver*. (V. N. Reinhold, Ed.). New York.
- Ewert, Paul, U. (1994). *Der Einfluss von Person und Situation auf die Beachtung von Verkehrsvorschriften*. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu. Bern.
- Fancher, P., Ervin, R., Sayer, J., Hagan, M., Bogard, S., Bareket, Z., ... Haugen, J. (1998). *Intelligent cruise control field operational test. Final report. Volume I: Technical report* (Vol. DOT/HS 808). Abgerufen von <http://www.its.dot.gov/welcome.htm>
- Färber, B. (2015). Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern. In *Autonomes Fahren* (S. 127–146). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9_7
- Fastenmeier, W. (Hrsg.) (1995). Autofahrer und Verkehrssituation - Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme (Mensch-Fahrzeug-Umwelt, Bd. 33). Köln: Verlag TÜV Rheinland.
- Fastenmeier, W., Hinderer, J., Lehnig, U., & Gsalter, H. (2001). Analyse von Spurwechselvorgängen im Verkehr. *Zeitschrift Für Arbeitswissenschaft*, 55, 15–23.
- Faw, H. W. (2013). To signal or not to signal: That should not be the question. *Accident Analysis and Prevention*, 59, 374–381. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.06.036>
- Fehr, E., & Gächter, S. (2000). Fairness and Retaliation: The Economics of Reciprocity. *Journal of Economic Perspectives*, 14(3), 159–182. <https://doi.org/10.1257/jep.14.3.159>
- Fekete, S., Vollrath, M., Huemer, A., & Salchow, C. (2015). Interaktionen im Straßenverkehr : Kooperation und Konflikt. In 8. VDI-Tagung Der Fahrer im 21. Jahrhundert, Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit, VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik, Braunschweig, DE, 10. - 11. Nov, 2015 (S. 325–338). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Feldhütter, A., Gold, C., Hu ger, A., & Bengler, K. (2016). Trust in Automation as a Matter of Media Influence and Experience of Automated Vehicles. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 60(1), 2024–2028. <https://doi.org/10.1177/1541931213601460>
- Fellendorf, M., & Vortisch, P. (2001). Validation of the Microscopic Traffic Flow Model VISSIM in Different Real-World Situations Validation of the Microscopic Traffic Flow Model VISSIM in Different Real-World Situations. In *80th TRB Annual Meeting*. Washington D.C.
- Ferrari, P., Cascetta, E., Nuzzolo, A., Treglia, P., & Olivotto, P. (1984). A behavioural approach to the measurement of motorway circulation comfort and safety. *Transportation Research Part A: General*, 18(1), 43–59. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(84\)90093-1](https://doi.org/10.1016/0191-2607(84)90093-1)
- Festner, M., Eicher, A., & Schramm. (2017). Beeinflussung der Komfort- und Sicherheits- wahrnehmung beim hochautomatisierten Fahren durch fahrfremde Tätigkeiten und Spurwechseldynamik . 1 Der Fahrstil automatisierter Fahrfunktionen. *Uni-DAS 11. Workshop Fahrerassistenzsysteme Und Automatisiertes Fahren, At Walting Im Altmühltal*, (March), 63–73.
- Finnegan, P., & Green, P. . (1990). *The Time to Change Lanes: A Literature Review*. Universität Michigan. Abgerufen von <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/894/80190.0001.001.pdf?sequence=2>
- Fitch, G. M., Lee, S. E., Klauer, S., Hankey, J., Sudweeks, J., & Dingus, T. (2009). Analysis of Lane-Change Crashes and near-Crashes. *US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration*, (June). <https://doi.org/DOT HS 811 147>
- FGSV, (1996). Richtlinien für die Anlagen von Straßen (RAS) Teil: Querschnitte (RAS-Q). FGSV Verlag.
- Frindte, W. (2008). *Kommunikationspsychologie — Medienpsychologie*. (U. Ulrike Six, U. Gleich, & R. Gimmler, Eds.), *Publizistik* (Beltz Verl, Vol. 53). Weinheim, Basel. <https://doi.org/10.1007/s11616-008-0019-4>
- Fritzsche, H. (1994). A model for traffic simulation. *Traffic Engineering & Control*, 35(5), 317–321.
- Fuest, T., Sorokin, L., Bellem, H., & Bengler, K. (2018). Advances in Human Aspects of Transportation, 597. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-60441-1>
- Gareth, J., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning*. *Springer Texts in Statistics* (Vol. 103). <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7>
- Gaziz, C., D., Herman, R., & Rothery, R. W. (1961). Nonlinear Follow-The-Leader Models of traffic flow. *Operations Research*, 9(4), 545–567.
- Geertz, C. (1973). *The Interpretation of Cultures*. New York: Basic Books, Inc. <https://doi.org/10.4324/9781912128310>
- Gerlough, D. L., & Huber, M. J. (1975). Traffic Flow Theory, A monograph (Special re, S. 17–31). Washington D.C.: Transportation Research Board.
- Gilbert, D. T., & Malone, P. S. (1995). The correspondence bias. *Psychological Bulletin*, 117(1), 21–38. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.117.1.21>
- Gipps, P. (1986a). Multsim: A model for simulating vehicular traffic on multi-lane arterial roads. *Mathematics and Computers in Simulation*, 28(4), 291–295.
- Gipps, P. G. (1986b). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B*, 20(5), 403–414. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(86\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0191-2615(86)90012-3)
- Gohl, I., & Schneemann, F. (2015). Analyse der Fahrer-Fußgänger Interaktion an Fußgängerüberwegen. In 8. VDI-Tagung Der Fahrer im 21. Jahrhundert: Braunschweig, 10. und 11. November 2015. (S. 41–52). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.
- Golob, T. F., & Recker, W. W. (2004). A method for relating type of crash to traffic flow characteristics on urban freeways. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(1), 53–80. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.08.002>
- Goswami, V. (2007). Gap Acceptance Behavior in Mandatory Lane Changes under Congested and Uncongested Traffic on a Multi-lane Freeway Gap Acceptance Behavior in Mandatory Lane Change. In *Transportation Research Board 86th Annual Meeting* (Vol. 10, S. 1–20).
- Green, D., & Swets, J. (1966). *Signal detection theory and psychophysics*. New York Wiley (Bd. 4054). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1901/jeab.1969.12-475>
- Green, M. (2000). “How Long Does It Take to Stop?” Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times. *Transportation Human Factors*, 2(3), 195–216. https://doi.org/10.1207/STHF0203_1
- Grice, H. P. (1975). Logic and conversation. In P. Cole & J. L. Morgan (Eds.), *Syntax and Semantics, Volume 3: Speech Acts* (S. 41–58). New York: Academic Press.
- Gurupackiam, S., & Jones, S. L. (2011). Empirical study of lane changing in urban streets under varying traffic conditions. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 16, 259–269. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.448>
- Guyon, I., & Elisseeff, A. (2003). An Introduction to Variable and Feature Selection. *Journal of Machine Learning Research (JMLR)*, 3(3), 1157–1182. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.07.027>
- Habibovic, A., Andersson, J., Nilsson, M., Lundgren, V. M., & Nilsson, J. (2016). Evaluating interactions with non-existing automated vehicles: Three Wizard of Oz approaches. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, 2016–August(Iv), 32–37. <https://doi.org/10.1109/IVS.2016.7535360>
- Habibovic, A., Andersson, J., Lundgren, V. M., Klingegård, M., & Englund, C. (2017). Background : Future interactions Interfaces : Minimalistic design Studies : Various traffic situations Results : Positive impact. In *Automated Vehicles Symposium 2017*.

- Hagen, K., Schulze, C., Schlag, B. (2012). FAT - Verkehrssicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern im Zusammenhang mit den geringen Geräuschniveau von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. In *FAT-Schriftenreihe*, vol. 245. VDA; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek. Berlin.
- Halati, A., Lieu, H., & Walker, S. (1997). CORSIM - Corridor Traffic Simulation Model. *Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century: Challenges, Innovations, and Opportunities*, (December), 570–576. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0447.2011.01711.x>
- Haar, A., Kleen, A., Albrecht, L., Schmettow, M., & Verwey, W. B. (2016). Intentionen wahrnehmen und Umfeld verstehen: Kognitive Prozesse in der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern. In *32. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren*,. Wolfsburg.
- Hanowski, R. J. (2000). *The impact of local/short haul operations on driver fatigue*. (Dissertation) Virginia Polytechnic Institute and State University Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Hanowski, R. J., Wierwille, W. W., Garness, S. A., Dingus, T. A., Knippling, R. R., & Carroll, R. J. (2000). A Field Evaluation of Safety Issues in Local/short Haul Trucking. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 44(20), 3-365-3–368. <https://doi.org/10.1177/154193120004402038>
- Hansen, T., Schulz, M., Michael, K., & Konigorski, U. (2016). Trajektorienplanung für automatisierte Fahrstreifenwechsel. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 66–71. <https://doi.org/10.1007/s3514>
- Hayward, J. C. (1971). *Near-Miss Determination Through. Highway Research Board*. Washington D.C.
- Heesen, M., Baumann, M., & Kelsch, J. (2012). Investigation of Cooperative Driving Behaviour during Lane Change in a Multi-Driver Simulation Environment. *Human Factors and Ergonomics Society (HFES) Europe Chapter Conference Toulouse*, 305–318.
- Heißing, B., Ersoy, M., & Gies, S. (2013). *Fahrwerkhandbuch*. (B. Heißing, M. Ersoy, & S. Gies, Eds.). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-01992-1>
- Heller, O. (1985). Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorienunterteilung (KU). *Psychologische Beiträge*, 27, 478–493.
- Henning, M. J. (2010). *Preparation for lane change manoeuvres : Behavioural indicators and underlying cognitive processes*. (Dissertation). TU Chemnitz. Abgerufen von <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-201001033>
- Henning, M., Schweigert, M., Baumann, M., & Krems, J.F. (2012). Eye-glance patterns during lane change manoeuvres. In A. G. Gale, J. Blomfield, G. Giguere, & R. J. Kiefer (Eds.), *Vision in Vehicles - IX* (S. 227–235). Loughbrough: Applied Vision Research Centre.
- Hetrick, S. (1997). Examination of Driver Lane Change Behavior and the Potential Effectiveness of Warning Onset Rules for Lane Change or “Side” Crash Avoidance Systems. *Virginia Polytechnic Institute and State University*. Abgerufen von <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-382915749731261/unrestricted/etd.pdf>
- Hidas, P. (2002). Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 10(5–6), 351–371. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(02\)00026-8](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(02)00026-8)
- Hidas, P. (2005). Modelling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 13(1), 37–62. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2004.12.003>
- Hoc, J.-M. (2001). Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54(4), 509–540. <https://doi.org/10.1006/ijhc.2000.0454>
- Hoffmann, S., & Buld, S. (2006). Darstellung und Evaluation eines Trainings zum Fahren in der Fahrsimulation. In VDI Verlag (Ed.), *VDI Wissensforum (Ed.), Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme (S. 113-132)*. Düsseldorf.
- Holmes, J. G. (2004). The benefits of abstract functional analysis in theory construction: The case of interdependence theory. *Personality and Social Psychology Review*. https://doi.org/10.1207/s15327957pspr0802_8
- Hölzel, A. (2008). *Unterscheidung von formeller und informeller Kommunikation im Straßenverkehr*. (Masterarbeit). Universität Wien. Abgerufen von http://othes.univie.ac.at/2541/1/2008-11-12_9547261.pdf
- Hoogendoorn, S. P., & Bovy, P. H. L. (2001). State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. In *Proceedings of Symposium on Theory of Traffic Flow* (Vol. 215, S. 283–303). General Motors Corp. Elsevier Publishing Co. <https://doi.org/10.1243/0959651011541120>
- Horrey, W. J., Wickens, C. D., & Consalus, K. P. (2006). Modeling drivers' visual attention allocation while interacting with in-vehicle technologies. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 12(2), 67–78. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.12.2.67>
- Howard, D. (2014). Public Perceptions of Self-driving Cars: The Case of Berkeley, California. *MS Transportation Engineering*, 2014(1), 21. (2018, 05.August). Abgerufen von <http://www.danielledai.com/academic/howard-dai-selfdrivingcars.pdf>
- Hu, M., Liao, Y., Wang, W., Li, G., Cheng, B., & Chen, F. (2017). Decision tree-based maneuver prediction for driver rear-end risk-avoidance behaviors in cut-in scenarios. *Journal of Advanced Transportation*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7170358>
- Hübner, M. (2012). *Modellbildung und Regelung eines kooperativen Straßenverkehrs mittels Petrinetzen und Konsens-Algorithmen*. (Dissertation). Universität Braunschweig.
- Hulse, L. M., Xie, H., & Galea, E. R. (2018). Perceptions of autonomous vehicles: Relationships with road users, risk, gender and age. *Safety Science*, 102(August 2017), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.001>
- Hunt, J. G., & Lyons, G. D. (1994). Modelling dual carriageway lane changing using neural networks. *Transportation Research Part C*, 2(4), 231–245. [https://doi.org/10.1016/0968-090X\(94\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0968-090X(94)90012-4)
- Hwang, S. Y., & Park, C. H. (2005). Modeling of the Gap Acceptance Behavior at a Merging Section of Urban Freeway. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 1641–1656.
- InterACT. (2017). (2018, 05.August), Abgerufen von <https://www.interact-roadautomation.eu/>
- ISO 15622. (2002). ISO 15622: Transport information and control systems - Adaptive Cruise Control systems - Performance requirements and test procedures. Abgerufen 15. April 2019, von <https://www.iso.org/standard/71515.html>
- ISO 17387. (2008). Intelligent transport systems — Lane change decision aid systems (LCDAS) — Performance requirements and test procedures. Abgerufen 18. April 2019, von <https://www.iso.org/standard/43654.html>
- ISO 22179. (2009). 22179:2009 Intelligent transport systems - Full speed range adaptive cruise control (FSRA) systems - Performance requirements and test procedures. Abgerufen 15. April 2019, von <https://www.iso.org/standard/40753.html>
- Jones, E. E., & Nisbett, R. E. (1972). The actor and the observer: Divergent perceptions of the causes of behavior. *Attribution: Perceiving the Causes of Behavior*. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.71.2.375>
- Jordan, M. I., & Mitchell, T. M. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science (New York, N.Y.)*, 349(6245), 255260. <https://doi.org/10.1126/science.aaa8415>
- Jovic, A., Brkic, K., & Bogunovic, N. (2015). A review of feature selection methods with applications. *2015 38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 1200–1205. <https://doi.org/10.1109/MIPRO.2015.7160458>
- Jula, H., Kosmatopoulos, E. B., & Ioannou, P. A. (1999). Collision Avoidance Analysis for Lane Changing and Merging, 49(6), 2295–2308.
- Kauffmann, N., Winkler, F., & Vollrath, M. (2018). What makes an automated vehicle a good driver?: Exploring lane change announcements in dense traffic situations. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings* (Vol. 2018–April). <https://doi.org/10.1145/3173574.3173742>
- Kasper, D. (2012). *Erkennung von Fahrmanövern mit objektorientierten Bayes-Netzen in Autobahnsszenarien*. Eberhard Karls Universität Tübingen.
- Keferböck, F., & Riener, A. (2015). Strategies for Negotiation between Autonomous Vehicles and Pedestrians. In *Mensch und Computer 2015*

- Workshopband (S. 525–532). Stuttgart: Oldenbourg Wissenschaftsverlag. Abgerufen von <http://dl.mensch-und-computer.de/handle/123456789/4753>
- Kerlinger, F. N. & Pehazur, E. J. (1973). *Multiple regression in behavioral research*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Kesting, A., Treiber, M., & Helbing, D. (2007). General Lane-Changing Model MOBIL for Car-Following Models. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1999(1), 86–94. <https://doi.org/10.3141/1999-10>
- Keyvan-Ekbatani, M., Knoop, V. L., & Daamen, W. (2016). Categorization of the lane change decision process on freeways. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 69, 515–526. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.11.012>
- Khamis, A. M., Kamel, M. S., & Salichs, M. A. (2006). Cooperation: Concepts and general typology. *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2, 1499–1505. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2006.384929>
- Kiling, A. S., & Baybura, T. (2012). Determination of Minimum Horizontal Curve Radius Used in the Design of Transportation Structures, Depending on the Limit Value of Comfort Criterion Lateral Jerk. In *FIG Working Week 2012, Rome, Italy, 6-10 May 2012* (S. 6–10). Rome.
- Kita, H. (1999). A merging-giveway interaction model of cars in a merging section: a game theoretic analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(3–4), 305–312. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(98\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(98)00039-1)
- Kleibelsberg, D. (1982). *Verkehrspsychologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-47507-8>
- Knapp, A., Neumann, M., Brockmann, M., Walz, R., & Winkle, T. (2009). *Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS*. (Bericht für das Projekt: RESPONSE 3 PREVENT Projekt)
- Kometani, E., & Sasaki, T. (1959). Dynamic Behavior of Traffic with a Nonlinear Spacing-Speed Relationship. In *Proceedings of Symposium on Theory of Traffic Flow, Research Laboratory, General Motors Corp. Elsevier Publishing Co.* (S. 105–119).
- König, W. (2015). Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, & C. Singer (Eds.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 621–632). Wiesbaden: Springer Verlag.
- Korteling, J. E. (1990). Perception-Response Speed and Driving Capabilities of Brain-Damaged and Older Drivers. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 32(1), 95–108. <https://doi.org/10.1177/001872089003200107>
- Kotsiantis, S. (2007). Supervised machine learning: A review of classification techniques. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 160, 3–24.
- Krauss, S. (1998). *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*. (Dissertation). Universität Köln.
- Krueger, H., Grein, M., Kaussner, A., & Mark, C. (2005). SILAB – A Task Oriented Driving Simulation. In *Proceedings of the driving simulator conference (DSC)* (S. 323–331). Iowa City: Universität of Iowa, USA.
- Kubat, M. (2017). *An Introduction to Machine Learning*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-63913-0>
- Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). *Applied Predictive Modeling*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6849-3>
- Kyriakidis, M., Happee, R., & De Winter, J. (2015). Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5000 respondents. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 32, 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.04.014>
- Lagström, T., & Lundgren, V. M. (2015). *AVIP - Autonomous vehicles' interaction with pedestrians An investigation of pedestrian-driver communication and*. (Masterarbeit). Chalmers University of Technology.
- Lange, A., Maas, M., Albert, M., Siedersberger, K., & Bengler, P. K. (2014). Automatisiertes Fahren – So komfortabel wie möglich, so dynamisch wie nötig Vestibuläre Zustandsrückmeldung beim automatisierten Fahren. In *VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik.Tagung; 30th, Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit; 2014;* (S. 215–228). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Lebbon, A. R., Austin, J., Van Houten, R., & Malenfant, L. E. (2007). Evaluating the Effects of Traffic on Driver Stopping and Turn Signal Use at a Stop Sign. *Journal of Organizational Behavior Management*, 27(2), 37–64. <https://doi.org/10.1300/J075v27n02>
- Lee, S., Olsen, E., & Wierwille, W. (2004). A comprehensive examination of naturalistic lane-changes. *Hs 809 702*. Blacksburg.
- Lee, J. D. (2018). *Perspectives on Automotive Automation and Autonomy*. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 12(1), 53–57. <https://doi.org/10.1177/1555343417726476>
- Leutzbach, W. (1988). *Introduction to the theory of traffic flow*. Springer Verlag.
- Lewis-Evans, B., De Waard, D., & Brookhuis, K. A. (2010). That's close enough—A threshold effect of time headway on the experience of risk, task difficulty, effort, and comfort. *Accident Analysis & Prevention*, 42(6), 1926–1933. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.05.014>
- Li, L., Wang, F. Y., & Kim, H. (2005). Cooperative driving and lane changing at blind crossings. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, 2005*, 435–440. <https://doi.org/10.1109/TVS.2005.1505142>
- Limbou, M., Flade, A., & Schönharting, J. (2000). *Mobilität im Kindes- und Jugendalter*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-99569-8>
- Lindgren, A., Chen, F., Jordan, P. W., & Zhang, H. (2008). Requirements for the design of advanced driver assistance systems - The differences between Swedish and Chinese drivers. *International Journal of Design*, 2(2), 41–54.
- Little, M. A., Varoquaux, G., Saeb, S., Lonini, L., Jayaraman, A., Mohr, D. C., & Kording, K. P. (2017). Using and understanding cross-validation strategies. Perspectives. *GigaScience*, 6(5), 1–6. <https://doi.org/10.1093/gigascience/gix020>
- Liu, A., & Pentland, A. (1997). Towards real-time recognition of driver intentions. *Proceedings of Conference on Intelligent Transportation Systems*, 236–241. <https://doi.org/10.1109/ITSC.1997.660481>
- Lobjois, R., & Cavallo, V. (2007). Age-related differences in street-crossing decisions: The effects of vehicle speed and time constraints on gap selection in an estimation task. *Accident Analysis and Prevention*, 39(5), 934–943. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.12.013>
- Locascio, J., Khurana, R., He, Y., & Kaye, J. (2016). Utilizing Employees As Usability Participants: Exploring When and When Not to Leverage Your Coworkers. *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 4533–4537. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858047>
- Loomis, J. L. (1959). Communication, the Development of Trust, and Cooperative Behavior. *Human Relations*, 12(4), 305–315. <https://doi.org/10.1177/001872675901200402>
- Ltd., S. V. E. (2018). CRISP-DM: Cross Industry Standard Process for Data Mining.(2018,04. Januar) Abgerufen von <http://crisp-dm.eu/>
- Maag, C. (2004). *Fahrer und Verkehrsklima*. (Dissertation). Julius-Maximilians-Universität Würzburg.
- Malone, T., & Crowston, K. (1994). The interdisciplinary study of coordination. *ACM Computing Surveys*, 26(1), 87–119. <https://doi.org/http://doi.acm.org/10.1145/174666.174668>
- Mandalia, H. M., & Salvucci, D. D. (2005). Using Support Vector Machines for Lane-Change Detection. *Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 49(22), 1965–1969. <https://doi.org/10.1177/154193120504902217>
- Manser, M. P. (1999). The Role of Ecological Validity in the Ability to Estimate Time-to-Contact. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 43(23), 1270–1274. <https://doi.org/10.1177/154193129904302302>
- Mataric, M. J. (1994). *Interaction and Intelligent Behavior*. Massachusetts. Abgerufen von <http://hdl.handle.net/1721.1/7343>
- Matthews, G., Dorn, L., & Ian Glendon, A. (1991). Personality correlates of driver stress. *Personality and Individual Differences*, 12(6), 535–549. [https://doi.org/10.1016/0191-8869\(91\)90248-A](https://doi.org/10.1016/0191-8869(91)90248-A)
- Maurer, C., Gerdes, C. J., Lenz, B., & Winner, H. (2015). Autonomes Fahren. In *Autonomes Fahren* (S. 219–239). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9>
- Marczak, F., Daamen, W., & Buisson, C. (2013). Key Variables of Merging Behaviour: Empirical Comparison Between Two Sites and

- Assessment of Gap Acceptance Theory. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 80, 678–697. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.07.007>
- Mayer, R. C., Davis, J. H., & Schoorman, F. D. (1995). An integrative model of organizational trust. *Academy of Management Review*, 20(3), 709–734. <https://doi.org/10.5465/AMR.1995.9508080335>
- McCall, J., Wipf, D., Trivedi, M. M., & Rao, B. D. (2007). Lane Change Intent Analysis Using Robust Operators and Sparse Bayesian Learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(3), 431–440. <https://doi.org/10.1109/TITS.2007.902640>
- McKnight, D. H., Cummings, L. L., & Chervany, N. L. (1998). Initial trust formation in new organizational relationships. *The Academy of Management Review*, 23, 473–490.
- McKnight, D. H., Carter, M., & Thatcher, J. B. (2011). Trust in a Specific Technology: An Investigation of Its Components and Measures Trust in a specific technology: An investigation of its components and measures. *ACM Trans. Manag. Inform. Syst.*, 2(25). <https://doi.org/10.1145/1985347.1985353>
- McLellan, E., Macqueen, K. M., & Neidig, J. L. (2003). Beyond the Qualitative Interview: *Field Methods*, 15(63), 63–84. <https://doi.org/10.1177/1525822X02239573>
- McLeod, R. W., & Ross, H. E. (1983). Optic-Flow and Cognitive Factors in Time-to-Collision Estimates. *Perception*, 12(4), 417–423. <https://doi.org/10.1068/p120417>
- MERCEDES-BENZ. (2015). Einfach Technik: So funktioniert DISTRONIC PLUS. Abgerufen 17. Februar 2018, von <https://blog.daimler.com/2015/03/18/einfach-technik-so-funktioniert-distrionic-plus/>
- Merten, K. (1977). Kommunikationsprozesse im Straßenverkehr. In *Symposium Unfallforschung und Verkehrssicherheit 1977=Schriftenreihe Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr* (14th ed., S. 115–126). Bundesminister für Verkehr.
- Mesken, J. (2006). *Determinants and consequences of drivers' emotions*. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2016.303326>
- Michaels, R. M. (1963). Perceptual Factors in Car-Following. In *Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow, OECD, Paris* (S. 44–59).
- Michon, J. A. (1985). A Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do? In *Human Behavior and Traffic Safety* (S. 485–524). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2173-6_19
- Mizell, L., Joint, M., & Connell, D. (1997). Aggressive driving: Three studies. *AAA Foundation for Traffic Safety*, (March), 1–13.
- Moridpour, S., Rose, G., & Sarvi, M. (2010). Effect of Surrounding Traffic Characteristics on Lane Changing Behavior. *Journal of Transportation Engineering*, 136(11), 973–985. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000165](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000165)
- Morris, B., Doshi, A., & Trivedi, M. (2011). Lane change intent prediction for driver assistance: On-road design and evaluation. In *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (S. 895–901). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IVS.2011.5940538>
- Mourant, R. R., & Rockwell, T. H. (1972). Strategies of Visual Search by Novice and Experienced Drivers. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 14(4), 325–335. <https://doi.org/10.1177/001872087201400405>
- Mourant, R. ., & Donohue, R. . (1974). Mirror Sampling Characteristics of Drivers. *SAE Technical Paper 740964*, 16. <https://doi.org/10.4271/740964>
- Müller, L., Risto, M., & Emmenegger, C. (2016). The social behavior of autonomous vehicles. *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing Adjunct - UbiComp '16*, 686–689. <https://doi.org/10.1145/2968219.2968561>
- Munigety, C. R., & Mathew, T. V. (2016). Towards Behavioral Modeling of Drivers in Mixed Traffic Conditions. *Transportation in Developing Economies*, 2(1), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s40890-016-0012-y>
- Neale, V. L., & Dingus, T. A. (1998). Commentaries in: Human Factor Issues for Automated Highway Systems (AHS). *Intelligent Transportation Systems Journal: Technology, Planning, and Operations*, 4, 111–119.
- Nees, M. A. (2016). Acceptance of Self-driving Cars: An Examination of Idealized versus Realistic Portrayals with a Self-driving Car Acceptance Scale. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 60(1), 1449–1453. <https://doi.org/10.1177/1541931213601332>
- Neukum, A., Naujoks, F., Kappes, S., & Wey, T. (2014). Kontrollierbarkeit unerwarteter Eingriffe eines Bremsassistentensystems aus Perspektive des Folgeverkehrs. In *9. Workshop Fahrerassistenzsysteme* (S. 115–125). Darmstadt: Uni-DAS e.V.
- Nowak, M. A. (2006). Five Rules for the Evolution of Cooperation. *Science*, 314, 1560–1563. (2018.05. August). Abgerufen von http://rocs.huberlin.de/complex_sys_2015/resources/Seminarpapers/Nowak_Cooperation.pdf
- Nordfjærn, T., Jrgensen, S., & Rundmo, T. (2011). A cross-cultural comparison of road traffic risk perceptions, attitudes towards traffic safety and driver behaviour. *Journal of Risk Research*, 14(6), 657–684. <https://doi.org/10.1080/13669877.2010.547259>
- Nordfjærn, T., Imekolu, Ö., & Rundmo, T. (2012). A comparison of road traffic culture, risk assessment and speeding predictors between Norway and Turkey. *Risk Management*, 14(3), 202–221. <https://doi.org/10.1057/rm.2012.5>
- Nordfjærn, T., Şimşekoğlu, Ö., & Rundmo, T. (2014). Culture related to road traffic safety: A comparison of eight countries using two conceptualizations of culture. *Accident Analysis and Prevention*, 62(October), 319–328. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.10.018>
- O'Brien, S., Shaw, L., Watson, B., & Lennon, A. (2012). Do drivers respond emotionally and behaviourally differently to an intentionally anger provoking driving situation than to an ambiguous, but potentially provocative, one? Results of a self-report survey. In *Proceedings of Australasian Road Safety Research, Policing and Education Conference 2012*. Australasian College of Road Safety (ACRS), Wellington, New Zealand.
- Ohta, H. (1993). Individual differences in driving distance headway. In S. Gale, A.G.; Brown, I.D.; Haslegrave, C.M.; Moorhead, I.; Taylor (Ed.), *Vision in Vehicles* (S. 91–100). Elsevier Science.
- Olsen, E. C. B. (2003). *Modeling slow lead vehicle lane changing*. (Dissertation) Virginia Polytechnic Institute and State University. Abgerufen von <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-12032003-152916/>
- Oxford Dictionaries. (2019). cooperation | Definition of cooperation in English. Abgerufen 2. Mai 2019, von <https://en.oxforddictionaries.com/definition/cooperation>
- Özkan, T., & Lajunen, T. (2006). What causes the differences in driving between young men and women? The effects of gender roles and sex on young drivers' driving behaviour and self-assessment of skills. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 9(4), 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2006.01.005>
- Pande, A., & Abdel-Aty, M. (2006). Assessment of freeway traffic parameters leading to lane-change related collisions. *Accident Analysis and Prevention*, 38(5), 936–948. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.03.004>
- Paternotte, C. (2014). Minimal Cooperation. *Philosophy of the Social Sciences*, 44(1), 45–73. <https://doi.org/10.1177/0048393112457428>
- Payre, W., Cestac, J., & Delhomme, P. (2014). Intention to use a fully automated car: Attitudes and a priori acceptability. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27(Part B), 252–263. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.04.009>
- Ponziani, R. (2012). Turn Signal Usage Rate Results: A Comprehensive Field Study of 12,000 Observed Turning Vehicles. In *SAE 2012 World Congress & Exhibition*. <https://doi.org/10.4271/2012-01-0261>
- Popescu, V., & Nedevschi, S. (2012). Cut-in Maneuver Recognition and Behavior Generation using Bayesian Networks and Fuzzy Logic. In *2012 IEEE 8th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing* (pp. 123–130). <https://doi.org/10.1109/ICCP.2012.6356174>
- Radecke, H.-D. (2013). ACC & Co - clevere Sicherheits-Assistenten verhindern Unfälle. Abgerufen 26. April 2019, von https://www.pcwelt.de/ratgeber/Sicherheits-Assistenten_ACC_verhindern_Unfaelle-7999049.html

- Rahman, M., Chowdhury, M., Xie, Y., & He, Y. (2013). Review of microscopic lane-changing models and future research opportunities. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(4), 1942–1956. <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2272074>
- Rehder, T., Maas, N., Louis, L., & Schramm, D. (2016a). Merkmalselektion zur Prädiktion von Motivationsbasiertem Fahrverhalten. In *Nationale und internationale Trends in der Mobilität* (S. 201–215). https://doi.org/10.1007/978-3-658-14563-7_13
- Rehder, T., Muenst, W., Louis, L., & Schramm, D. (2016b). Learning Lane Change Intentions through Lane Contentedness Estimation from Demonstrated Driving. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC* (S. 893–898). Rio de Janeiro, Brazil: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795661>
- Richtel, M., & Dougherty, C. (2015). Google's Driverless Cars Run Into Problem: Cars With Drivers - The New York Times. *New York Times*.
- Rinder, Lukas (2018). Klassifikation eines kooperativen Fahrstreifenwechsels durch maschinelles Lernen (nichtveröffentlichte Bachelorarbeit). Technische Hochschule Deggendorf, Deggendorf.
- Risser, R. (1984). Behavior in traffic conflict situations. *Accident Analysis and Prevention*, 17(2), 179–197.
- Risser, R. (1987). *Kommunikation und Kultur des Straßenverkehrs. Literas*. Wien: Literas Ges.m.b.H., Universitäts-, Buch- und Zeitschriftenverlag.
- Robertson, R. D., Meister, S. R., Vanlaar, W. G. M., & Mainegra Hing, M. (2017). Automated vehicles and behavioural adaptation in Canada. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 104(July), 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.08.005>
- Robinson, G. H., Erickson, D. J., Thurston, G. L., & Clark, R. L. (1972). Visual search by automobile drivers. *Human Factors*, 14(4), 315–323. <https://doi.org/10.1177/001872087201400404>
- Rödel, C., Stadler, S., Meschtscherjakov, A., & Tscheligi, M. (2014). Towards Autonomous Cars: The Effect of Autonomy Levels on Acceptance and User Experience. In *Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (S. 1–8). Seattle, WA, USA. <https://doi.org/10.1145/2667317.2667330>
- Rogers, C. R. (2002). *Die klientenzentrierte Gesprächspsychotherapie*. Fischer-Taschenbuch-Verlag
- Röhner, J., & Schütz, A. (2012). Klassische Kommunikationstheorien und -modelle. In *Psychologie der Kommunikation* (2nd ed., S. 15–25). Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-531-18891-1_2
- Ross, L., Greene, D., & House, P. (1977). The “false consensus effect”: An egocentric bias in social perception and attribution processes. *Journal of Experimental Social Psychology*. [https://doi.org/10.1016/0022-1031\(77\)90049-X](https://doi.org/10.1016/0022-1031(77)90049-X)
- Rothenbücher, D., Li, J., Sirkin, D., Mok, B., & Ju, W. (2016). Ghost driver: A field study investigating the interaction between pedestrians and driverless vehicles. In *25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, RO-MAN 2016* (S. 795–802). <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2016.7745210>
- Rundmo, T., Granskaya, J., & Klempe, H. (2012). Traffic culture as symbol exchange - A cross-country comparison of Russia and Norway. *Safety Science*, 50(5), 1261–1267. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.12.001>
- SAE international. (2016). AUTOMATED DRIVING - LEVELS OF DRIVING AUTOMATION ARE DEFINED IN NEW SAE INTERNATIONAL STANDARD J3016. *SAE International*. <https://doi.org/P141661>
- Salvucci, D. D., Liu, A., & Boer, E. (2001). Control and monitoring during lane changes. *Proc. of the 9th International Conference on Vision In Vehicles*, 8.
- Salvucci, D. D. (2006). Modeling Driver Behavior in a Cognitive Architecture. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 48(2), 362–380. <https://doi.org/10.1518/001872006777724417>
- Salvucci, D. D., & Mandalia, H. M. (2007). *Lane-Change Detection Using a Computational Driver Model*. *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, 49(3), 532–542. <https://doi.org/10.1518/001872007X200157>
- Scherer, S., Dettmann, A., Hartwich, F., Pech, T., Bullinger, A. C., Krems, J. F., & Wanielik, G. (2015). How the driver wants to be driven - Modelling driving styles in highly automated driving. *Tagungsband 7. Tagung Fahrerassistenz*, 25, 49(0).
- Scherer, S., Schubert, D., Dettmann, A., Hartwich, F., Bullinger, A. C. (2016). Wie will der „Fahrer“ automatisiert gefahren werden? - Überprüfung verschiedener Fahrstile hinsichtlich des ... In *Tagungsband 32. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren. 08.11.2016 bis 09.11.2016, Wolfsburg*. Wolfsburg: VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren.
- Schießl, C. (2008). Continuous subjective strain measurement. *IET Intelligent Transport Systems*, 2(2), 161. <https://doi.org/10.1049/iet-its:20070028>
- Schiff, W., & Oldak, R. (1990). Accuracy of judging time to arrival: Effects of modality, trajectory, and gender. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(2), 303–316. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.16.2.303>
- Schlag, B. (2008). Leistungsfähigkeit und Mobilität im Alter. In *Mobilität und Alter*.
- Schleinitz, K., Petzoldt, T., & Krems, J. F. (2015). *Geschwindigkeitswahrnehmung von einspurigen Fahrzeugen. Forschungsbericht / Unfallforschung der Versicherer (UDV)*.
- Schmidt, S., & Färber, B. (2009). Pedestrians at the kerb - Recognising the action intentions of humans. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12(4), 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2009.02.003>
- Schneider, J. H. (2009). *Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme*. (Dissertation). Technischen Universität Chemnitz.
- Schoettle, B., & Sivak, M. (2014). A survey of public opinion about autonomous and self-driving vehicles in the U.S., the U.K., and Australia. Abgerufen von <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/108384?show=full>
- Schouwenaars, T.; How, J., & Feron, E. (2004). Decentralized Cooperative Trajectory Planning of Multiple Aircraft with Hard Safety Guarantees. Technischer Bericht, Massachusetts Institute of Technology.
- Schulz von Thun, F. (1981). *Miteinander reden 1. Störungen und Klärungen. Allgemeine Psychologie der Kommunikation*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH.
- Schweigert, M. (2003). *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben*. (Dissertation). TU München, München.
- Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Shinar, D. (1998). Aggressive driving: the contribution of the drivers and the situation. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 1(2), 137–160. [https://doi.org/10.1016/S1369-8478\(99\)00002-9](https://doi.org/10.1016/S1369-8478(99)00002-9)
- Siebert, F. W., Oehl, M., & Pfister, H. (2014). The influence of time headway on subjective driver states in adaptive cruise control. *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour*, 25, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.05.005>
- Simon, K., & Bullinger, A. C. (2017). Was stresst, ärgert und beunruhigt Fahrer? Emotionale Reaktionen auf alltägliche Fahrsituationen bei jüngeren und älteren Fahrern. In *Der Fahrer im 21. Jahrhundert, Braunschweig, Volume: VDI-Berichte 2311* (Vol. 2311, pp. 35–47). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Simpson, J. A. (2007). Psychological foundations of trust. *Current Directions in Psychological Science*, 16(5), 264–268. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2007.00517.x>
- Sivak, M., & Schoettle, B. (2015). *Road Safety With Self-Driving Vehicles: General Limitations and road sharing with conventional vehicles*. *Transportation Research Institute*. Ann Arbor, Michigan: University of Michigan. Abgerufen von <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/111735>
- Smart Vision Europe. (2018). CRISP-DM: Cross Industry Standard Process for Data Mining. Abgerufen 4. Januar 2018, von <http://crisp->

- Staplin, L., Lococo, K., Sim, J. J., & Gish, K. (1998). *Simulator-based assessment of driver-side mirrors for passenger cars*. Washington, DC: Statistisches Bundesamt. (2015). *Unfallentwicklung auf deutschen Strassen 2015*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen von https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressekonferenzen/2016/Unfallentwicklung-2015/pressebrochure-unfallentwicklung.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Stiller, C., & Pink, O. (2012). Real-Time Knowledge for Cooperative Cognitive Automobiles. In *Advances in Real-Time Systems* (S. 341–355). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24349-3_17
- Stern, E. (1999). Reactions to congestion under time pressure. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 7(2–3), 75–90. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(99\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(99)00013-3)
- Strobl, M. H. (2003). SPIDER - The innovative software framework of the BMW driving simulation. In *Simulation und Simulatoren - Mobilität virtuell gestalten. Tagung der VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik in Hamburg, 15. und 16. April 2003* (S. 303–320). Hamburg: VDI Verlag GmbH.
- StVO. (2018). Straßenverkehrs- Ordnung § 7 Benutzung von Fahrstreifen durch Kraftfahrzeuge. 12. February 2018, Abgerufen von <https://dejure.org/gesetze/StVO/7.html>
- Sukhan Lee, Woong Kwon, & Jae-Won Lee. (1999). A vision based lane departure warning system. *Proceedings 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human and Environment Friendly Robots with High Intelligence and Emotional Quotients (Cat. No.99CH36289)*, 1, 160–165. <https://doi.org/10.1109/IROS.1999.812998>
- Summala, H. (2014). Brake Reaction Times and Driver Behavior Analysis Brake Reaction Times and. *Transportation Human Factors*, 217–226. <https://doi.org/10.1207/STHF0203>
- Talebpoor, A., Mahmassani, H. S., & Hamdar, S. H. (2015). Modeling lane-changing behavior in a connected environment: A game theory approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 59, 216–232. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2015.07.007>
- Tang, J., Alelyani, S., & Liu, H. (2014). Feature Selection for Classification: A Review. *Data Classification: Algorithms and Applications*, 37–64. <https://doi.org/10.1.1.409.5195>
- Tasca, L. (2000). A Review Of the literature On Aggressive Driving Research. In *First Global Web Conference on Aggressive Driving*. Ontario, Canada. Abgerufen von <https://www.stopandgo.org/research/aggressive/tasca.pdf>
- Tauer, J. M., & Harackiewicz, J. M. (2004). The effects of cooperation and competition on intrinsic motivation and performance. *Journal of Personality and Social Psychology*, 86(6), 849–861. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.86.6.849>
- Thiemann, C., Treiber, M., & Kesting, A. (2008). Estimating Acceleration and Lane-Changing Dynamics Based on NGSIM Trajectory Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2088, 90–101. <https://doi.org/10.3141/2088-10>
- Toledo, T., & Zohar, D. (2007). Modeling Duration of Lane Changes. *Transportation Research Record*, 1999(1), 71–78. <https://doi.org/10.3141/1999-08>
- Toledo, T., Koutsopoulos, H. N., & Ben-Akiva, M. (2009). Estimation of an integrated driving behavior model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17(4), 365–380. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2009.01.005>
- Tsung-Ying Sun, Shang-Jeng Tsai, Jiun-Yuan Tseng, & Yen-Chang Tseng. (2005). The study on intelligent vehicle collision-avoidance system with vision perception and fuzzy decision making. In *IEEE Proceedings. Intelligent Vehicles Symposium, 2005*. (pp. 112–117). <https://doi.org/10.1109/IVS.2005.1505087>
- Van der Horst, A. R. A. (1990). *A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters*. (Nicht veröffentlichte Dissertation). Soesterberg, the Netherlands: TNO Institute for Perception .
- Van Winsum, W., & Heino, A. (1996). Choice of time-headway in car-following and the role of time-to-collision information in braking. *Ergonomics*, 39(4), 579–592. <https://doi.org/10.1080/00140139608964482>
- Van Winsum, W., & Brouwer, W. (1997). Time Headway in Car following and Operational Performance during Unexpected Braking. *Perceptual and Motor Skills*, 84(3_suppl), 1247–1257. <https://doi.org/10.2466/pms.1997.84.3c.1247>
- Van Winsum, W., de Waard, D., & Brookhuis, K. . (1999). Lane change manoeuvres and safety margins. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(3), 139–149. [https://doi.org/10.1016/S1369-8478\(99\)00011-X](https://doi.org/10.1016/S1369-8478(99)00011-X)
- Venkatraman, V., Lee, J. D., & Schwarz, C. W. (2016). Steer or Brake? Modeling Drivers' Collision Avoidance Behavior Using Perceptual Cues. *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*, 2602(16–6657), 97–103. <https://doi.org/10.3141/2602-12>
- Vacek, S., Nagel, R., Batz, T., Moosmann, F., & Dillmann, R. (2007). An integrated simulation framework for cognitive automobiles. *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2007 IEEE*, 221–226. <https://doi.org/10.1109/IVS.2007.4290118>
- Verband der Automobilindustrie e.V. (2015). Automatisierung Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. *VDA Magazin - Automatisierung*, 3–21. Abgerufen von <https://www.vda.de/dam/vda/publications/2015/automatisierung.pdf>
- Verband der Automobilindustrie e.V. (2018). VDA - Automatisiertes Fahren. March 4, 2018, Abgerufen von <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/automatisiertes-fahren.html#f>
- Vogel, K. (2003). A comparison of headway and time to collision as safety indicators. *Accident Analysis and Prevention*, 35(3), 427–433. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(02\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00022-2)
- Vollrath, M., & Krems, J. F. (2011). *Verkehrspsychologie Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker* (1. Auflage). Kohlhammer Verlag.
- Wachenfeld, W., Winner, H., Gerdes, C., Lenz, B., Maurer, M., Beiker, S. A., ... Winkle, T. (2015). Use-Cases des autonomen Fahrens. In *Autonomes Fahren* (S. 9–37). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9_2
- Wallén Warner, H., Özkan, T., & Lajunen, T. (2009). Cross-cultural differences in drivers' speed choice. *Accident Analysis and Prevention*, 41(4), 816–819. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.04.004>
- Walch, M., Rudolf, M., Baumann, K., Walch, M., Sieber, T., Hock, P., ... Weber, M. (2016). Towards Cooperative Driving : Involving the Driver in an Autonomous Vehicle ' s Decision Making Towards Cooperative Driving : Involving the Driver in an Autonomous Vehicle ' s Decision Making. (November), 8. <https://doi.org/10.1145/3003715.3005458>
- Wang, D., Hu, M., Wang, Y., Wang, J., Qin, H., & Bian, Y. (2016). Model predictive control-based cooperative lane change strategy for improving traffic flow. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(2), 168781401663299. <https://doi.org/10.1177/1687814016632992>
- Watzlawick, P., Bavelas, J. B., & Jackson, D. D. (1990). *Menschliche Kommunikation : Formen, Störungen, Paradoxien*. H. Huber.
- Wei, J., Dolan, J. M., & Litkouhi, B. (2013). Autonomous vehicle social behavior for highway entrance ramp management. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, (Iv)*, 201–207. <https://doi.org/10.1109/IVS.2013.6629471>
- Werneke, J., & Vollrath, M. (2012). What does the driver look at? the influence of intersection characteristics on attention allocation and driving behavior. *Accident Analysis and Prevention*. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.09.048>
- Wickens, C. D., Goh, J., Helleberg, J., Horrey, W. J., & Talleur, D. A. (2003). Attentional Models of Multitask Pilot Performance Using Advanced Display Technology. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 45(3), 360–380. <https://doi.org/10.1518/hfes.45.3.360.27250>
- Wiedemann, R. (1974). *Simulation des Straßenverkehrsflusses. Heft 8 der Schriftenreihe des IfV*. Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Wilbrink, M., & Schieben, A. (2016). How to interact with a Cybercar? – Attitudes and expectations on the interaction and, (November). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21819.82726>
- Wilde, G. J. S. (1976). Social interaction patterns in driver behaviour: An introductory review. *Human Factors*, 18(5), 477–492.

- <https://doi.org/10.1177/001872087601800506>
- Winner, H., Hakuli, S., & Wolf, G. (2012). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (2. Auflage). Vieweg+Teubner Verlag |Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8619-4_33
- Wissing, C., Nattermann, T., Glander, K. H., Hass, C., & Bertram, T. (2017). Lane Change Prediction by Combining Movement and Situation based Probabilities. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 3554–3559. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.960>
- Witzlack, C. ., Beggiato, M. ., & Krems, J. F. (2016). Interaktionssequenzen zwischen Fahrzeugen und Fußgängern im Parkplatzszenario als Grundlage für kooperativ interagierende Automatisierung. In *Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren. VDI-Berichte 2288* (S. 323–336). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Worrall, R. D., & Bullen, A. G. . (1970). An Empirical Analysis of Lane Changing On Multilane Highways. *Highway Research Record*, 303, 30–43.
- Wu, N. (2000). Verkehr auf Schnellstraßen im Fundamentaldiagramm- Ein neues Modell und seine Anwendungen. *Straßenverkehrstechnik*, 44(8), 1–25.
- Xue, J. H., & Titterington, D. M. (2008). Comment on “on discriminative vs. generative classifiers: A comparison of logistic regression and naive bayes.” *Neural Processing Letters*, 28(3), 169–187. <https://doi.org/10.1007/s11063-008-9088-7>
- Yan, X., Radwan, E., & Guo, D. (2007). Effects of major-road vehicle speed and driver age and gender on left-turn gap acceptance. *Accident Analysis and Prevention*, 39(4), 843–852. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.12.006>
- Zimmermann, M., Fahrmeier, L., & Bengler, K. J. (2015). A Roland for an Oliver? Subjective perception of cooperation during conditionally automated driving. In *2015 International Conference on Collaboration Technologies and Systems, CTS 2015* (S. 57–63). Atlanta, GA, USA. <https://doi.org/10.1109/CTS.2015.7210400>
- Zimmermann, M., Schopf, D., Lütteken, N., Liu, Z., Storost, K., Baumann, M., ... Bengler, K. J. (2018). Carrot and stick: A game-theoretic approach to motivate cooperative driving through social interaction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 88(February), 159–175. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.01.017>

15 Anhang

Anhang A

Versuchsmaterial und statistische Werte der Untersuchung der Außenwirkung des Folgefahrers in einer Fahrstreifenwechselsituation

Anhang B

Versuchsmaterial und statistische Werte der Untersuchung der Außenwirkung des E in einer Fahrstreifenwechselsituation I

Anhang C

Versuchsmaterial und statistische Werte der Untersuchung der Außenwirkung des E in einer Fahrstreifenwechselsituation II

Anhang D

Versuchsmaterial und statistische Werte der Evaluationsstudie Spurwechselstrategie

Anhang E

Versuchsmaterial und statistische Werte der Evaluationsstudie Bremsstrategie

Anhang F

Versuchsmaterial und statistische Werte der Realverkehrsstudie

Anhang A1: Vorbefragung

Anmerkung: Die Probanden befanden sich in einem Probandenpool vom WIVW. Dort waren die demografischen Daten, wie Alter, Fahrerfahrung, Geschlecht usw. bereits gespeichert und mussten nicht separat abgefragt werden.

VPkürzel: _____

Vorbefragung

Stellen Sie sich vor Sie sind im dichten Verkehr auf der Autobahn. Sie wollen einen Fahrstreifenwechsel durchführen...

1. Wer ist bei Ihrer Entscheidung, ob ein Fahrstreifenwechsel möglich ist, relevant?

2. Welche Indikatoren haben Sie genutzt, um sich zu entscheiden, ob ein Fahrstreifenwechsel möglich ist?

Anhang A2: Instruktion

Instruktion

In der Studie zum Spurwechselverhalten soll im Rahmen einer Versuchsfahrt untersucht werden, welche Hinweise der Fahrer von anderen Verkehrsteilnehmern berücksichtigt, um auf Kooperationsbereitschaft zu schließen und sich für oder gegen einen Fahrstreifenwechsel zu entscheiden. Ziel ist es sich in den fließenden Verkehr auf dem linken Fahrstreifen einzufädeln.

Sie selbst werden auf dem rechten Fahrstreifen mit niedriger Geschwindigkeit von 20 km/h mit Tempomat fahren. Auf dem linken Fahrstreifen werden sich Kolonnen von Fahrzeugen befinden, welche mehr oder weniger mit Ihnen kooperieren werden.

Ihre Aufgabe besteht darin, nach Aufforderung des Versuchsleiters den Blinker zu setzen und danach zu entscheiden, ob ein Fahrstreifenwechsel möglich ist oder nicht. Wenn dieser sicherheitskritisch ist, sollen Sie diesen **nicht** ausführen. Den Zeitpunkt zu dem der Blinker gesetzt wird als auch die Wahl der Lücke bestimmen Sie. Nach jedem Spurwechsel begeben Sie sich bitte wieder zügig auf den rechten Fahrstreifen.

Danach werde ich Ihnen jeweils einige kurze Fragen stellen.

Der Versuch besteht aus 27 Situationen und dauert ca. 1 ½ Stunden. Im Anschluss an die Fahrt findet eine kurze Nachbefragung statt.

Falls es Fragen gibt, können Sie sich jederzeit beim Versuchsleiter melden.

Gute Fahrt!

Anhang A3: Handout

Handout

Bitte beantworten Sie nach jeder Situation die folgenden Fragen. Bei der folgenden Skala müssen Sie eine zweistufige Beurteilung abgeben: Entscheiden Sie sich zuerst für eine Verbalkategorie und stufen Sie anschließend mit einer Zahl feiner ab.

a. Wie kooperativ erschien der Fahrer auf der mittleren Spur?

gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			viel			sehr viel		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

b. Wie eindeutig hat der Fahrer auf mittleren Spur seine Intention angezeigt?

gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			stark			sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

c. Bitte bewerten Sie die Kritikalität der Situation beim Einschervorgang.

Bitte beachten Sie dabei, dass Bewertungen **kleiner 7** für die Fahr- und Verkehrssicherheit in realen Verkehrssituationen noch tolerierbar sind.

Die Situation war

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
unangenehm	6
	5
	4
harmlos	3
	2
	1
nichts bemerkt	0

Anhang A4: Darstellung der Parameterkombination pro Situation.

Situation	t (s)	v_{diff} (m/s)	a (m/s²)
1	0	7	0.5
2	1	7	0.5
3	2	7	0.5
4	0	4	0.5
5	1	4	0.5
6	2	4	0.5
7	0	2	0.5
8	1	2	0.5
9	2	2	0.5
10	0	7	1
11	1	7	1
12	2	7	1
13	0	4	1
14	1	4	1
15	2	4	1
16	0	2	1
17	1	2	1
18	2	2	1
19	0	7	1.5
20	1	7	1.5
21	2	7	1.5
22	0	4	1.5
23	1	4	1.5
24	2	4	1.5
25	0	2	1.5
26	1	2	1.5
27	2	2	1.5

Anhang B

Anhang B1: Instruktion

Instruktion

In der Studie zum Spurwechselverhalten soll im Rahmen einer Versuchsfahrt das Fahrzeug bewertet werden, das auf verschiedene Art und Weise seinen Spurwechselwunsch aufzeigt.

Sie selbst werden auf dem mittleren Fahrstreifen mit niedriger Geschwindigkeit von 30 km/h hinter einem LKW fahren. Um einen gleichbleibenden Abstand zum Vorderfahrzeug zu gewährleisten wird ein ERS (Enhanced Reality Strip) verwendet, der Ihnen je nach Farbe aufzeigt, ob Sie sich zu nah (Farbe gelb) oder zu weit weg (Farbe lila) von dem LKW befinden. Beim korrekten Abstand verschwindet der Streifen vor Ihnen. Versuchen Sie, wenn möglich den Abstand nach vorne zu halten. Auf dem rechten Fahrstreifen werden sich Kolonnen von Fahrzeugen befinden, welche auf unterschiedliche Art ihren Spurwechselwunsch anzeigen und gegebenenfalls durchführen.

Ihre Aufgabe besteht darin, auf den Einscherer zu reagieren und einscheren zu lassen, wenn möglich. Bitte versuchen Sie sich an eine Geschwindigkeit von 30km/h zu halten. Bitte beachten Sie die StVO und vermeiden Sie Kollisionen. Nach jedem Spurwechsel des Einscherers würden wir Sie bitten ein paar kurze Fragen zur soeben erlebten Situation zu beantworten bevor das neue Ereignis beginnt.

Falls es Fragen gibt, können Sie sich jederzeit beim Versuchsleiter melden.

Gute Fahrt!

Anhang B2: Handout

Handout

Bitte beantworten Sie nach jeder Situation die folgenden Fragen. Bei der folgenden Skala müssen Sie eine zweistufige Beurteilung abgeben: Entscheiden Sie sich zuerst für eine Verbalkategorie und stufen Sie anschließend mit einer Zahl feiner ab.

Unter „kooperativem und eindeutigem Verhalten“ versteht man in dem Zusammenhang

Kooperatives Verhalten beim Spurwechsel

Der andere Fahrer ist kooperativ: Er nimmt Kontakt auf und ersucht mich ihn vor mir hineinzulassen.

Der andere Fahrer ist nicht kooperativ: Er wechselt, (denoch unter Einsatz des Blinkers), aber ohne Kontakt aufzunehmen die Spur.

Eindeutiges Verhalten = Der Fahrer weiß was er tun will, nachdem ich verzögert habe

a. Wie kooperativ war die Fahrstreifenwechselankündigung auf der rechten Spur?

gar nicht	sehr schwach			wenig			mittel			viel			sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

b. Wie eindeutig hat der Fahrer seine Intention gezeigt?

gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			stark			sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

c. Wie eindeutig haben Sie dem Fahrzeug signalisiert, dass es einscheren kann?

gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			stark			sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

d. Bitte bewerten Sie die Kritikalität der Situation beim Einschervorgang.

Bitte beachten Sie dabei, dass Bewertungen **kleiner 7** für die Fahr- und Verkehrssicherheit in realen Verkehrssituationen noch tolerierbar sind.

Die Situation war

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
unangenehm	6
	5
	4
harmlos	3
	2
	1
nichts bemerkt	0

Anhang B3: Darstellung der Parameterkombination pro Situation.

Situation	Blinkerstart (m)	Verweildauer (s)	Spurwechseldauer (s)
1	12	1	4
2	12	1	6
3	12	1	8
4	12	2	4
5	12	2	6
6	12	2	8
7	12	3	4
8	12	3	6
9	12	3	8
10	16	1	4
11	16	1	6
12	16	1	8
13	16	2	4
14	16	2	6
15	16	2	8
16	16	3	4
17	16	3	6
18	16	3	8
19	20	1	4
20	20	1	6
21	20	1	8
22	20	2	4
23	20	2	6
24	20	2	8
25	20	3	4
26	20	3	6
27	20	3	8

Anhang C

Anhang C1: Demografischer Fragebogen

Angaben zur Person

3. Alter:	4. Geschlecht:	5. BMW Ressort:	6. Führerscheinbesitz in Jahren:
_____ Jahre	<input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> weiblich	_____	_____

7. Wie hoch ist Ihre **jährliche Fahrleistung** in Kilometern?

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> bis 5.000 km/Jahr | <input type="checkbox"/> 20.000 bis 30.000 km/Jahr |
| <input type="checkbox"/> 5.000 bis 10.000 km/Jahr | <input type="checkbox"/> bis 40.000 km/Jahr |
| <input type="checkbox"/> 10.000 bis 20.000 km/Jahr | <input type="checkbox"/> über 40.000 km/Jahr |

8. Wie fahren Sie in die Arbeit?

- | | | |
|---|---|--|
| <input type="checkbox"/> mit den öffentlichen Verkehrsmitteln
_____) | <input type="checkbox"/> mit dem Auto (Fahrzeug
_____) | <input type="checkbox"/> mit
dem Fahrrad/zu Fuß |
|---|---|--|

9. Wie oft fahren Sie auf Autobahnen?

- ☐ <1 × pro Woche ☐ 1-2 × pro Woche ☐ 3-5 × pro Woche ☐ täglich

10. Wie oft erleben Sie den Berufsverkehr?

- ☐ <1 × pro Woche ☐ 1-2 × pro Woche ☐ 3-5 × pro Woche ☐ täglich

11. In welcher Umgebung fahren Sie am häufigsten?

- ☐ Stadtverkehr ☐ Landstraße ☐ Autobahn

12. Wie oft haben Sie bisher an **Fahrsimulatorstudien** teilgenommen?

- ☐ noch nie ☐ ein- bis dreimal ☐ vier- bis sechsmal ☐ mehr als sechsmal

13. Eigene Fahrleistung						
		1	2	3	4	5
Ich schätze mich als Autofahrer folgendermaßen ein	unerfahren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> sehr erfahren
Meinen Fahrstil würde ich beschreiben als:	ruhig/ausgeglichen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> sportlich/dynamisch
Meine Kontrolle über das Fahrzeug schätze ich wie folgt ein:	gering	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> hoch
Autofahren bedeutet für mich:	notwendiges Übel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Spaß

Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen (**alle Daten werden anonym ausgewertet!**).

Ist bei Ihnen eine **Sehschwäche** oder eine andere **Erkrankung am Auge** festgestellt worden? ☐ nein ☐ ja

Falls ja, wieviel Dioptrien?
li: _____ re: _____
Andere? _____

Haben Sie andere **körperliche Einschränkungen?** (z.B. Beinverletzungen, starke Gelenkschmerzen, o.Ä.) ☐ nein ☐ ja

Falls ja, welche?

Wieviel **Schlaf** hatten Sie in der letzten Nacht? _____ Anzahl an Stunden: _____ Das ist für mich: ☐ wenig ☐ normal ☐ viel

Sind sie derzeit uneingeschränkt **fahrtüchtig**? ☐ nein ☐ ja

Wie würden Sie Ihren **Fahrstil** außerdem beschreiben?

(Halten Sie lieber einen sehr großen Abstand zum Vordermann oder genügt Ihnen ein geringerer Abstand und ein späterer Bremszeitpunkt?) ☐ sehr niedriger Abstand ☐ niedriger Abstand ☐ mittlerer Abstand ☐ großer Abstand ☐ Sehr großer Abstand

Wie schätzen Sie ihren aktuellen Wachheitszustand ein?

- ☐ Äußerst wach
- ☐ Sehr wach
- ☐ Normal wach
- ☐ Ziemlich wach
- ☐ Weder wach noch schläfrig
- ☐ Etwas schläfrig
- ☐ Schläfrig, ohne Mühe wach zu bleiben
- ☐ Schläfrig, etwas Mühe wach zu bleiben

- ☐Schläfrig, große Mühe wach zu bleiben
- ☐Äußerst schläfrig, kann nicht wach bleiben

Wie schätzen Sie ihre aktuelle Stimmung ein?



Die von Ihnen angegebenen Daten werden **ausschließlich** zur internen Verwendung erhoben und nicht an Dritte weitergegeben.

Anhang C2: Vorfragebogen

Vorbefragung

VPkürzel/Probanden ID: _____

a. Sie fahren auf der Autobahn, wieder auf der mittleren Spur. Jetzt herrscht stockender Verkehr. Auf allen Spuren fahren die Fahrzeuge mit etwa 30 km/h Sie wollen die nächste Ausfahrt nehmen und müssen hierfür auf die rechte Spur wechseln. Die Ausfahrt befindet sich in etwa 500 Metern vor Ihnen. Die Lücken auf der rechten Spur sind zu klein, als dass Sie einfach herüberziehen könnten. Wie gehen Sie nun vor?

b. Was empfinden Sie aus der Folgefaherperspektive bei einem Fahrzeug, das einen Fahrstreifenwechsel ankündigt als kooperativ, was als rücksichtslos?

Anhang C3: Instruktion

Instruktion

In der Studie soll im Rahmen einer Versuchsfahrt ein Fahrzeug bewertet werden, das auf verschiedene Art und Weise seinen Fahrstreifenwechselwunsch aufzeigt.

Sie selbst werden auf dem mittleren Fahrstreifen mit niedriger Geschwindigkeit von 30 km/h hinter einem Fahrzeug fahren. Um einen gleichbleibenden Abstand zum Vorderfahrzeug zu gewährleisten wird ein ERS (Enhanced Reality Strip) verwendet, der Ihnen je nach Farbe aufzeigt, ob Sie sich zu nah (Farbe gelb) oder zu weit weg (Farbe lila) von dem Fahrzeug befinden. Beim korrekten Abstand verschwindet der Streifen vor Ihnen. Versuchen Sie, wenn möglich den Abstand nach vorne zu halten. Auf dem rechten Fahrstreifen wird sich ein Fahrzeug befinden, welches unter Einsatz des Blinkers seinen Wunsch einzuscheren ankündigt. Dieses wird von ihrem Vorderfahrzeug nicht hineingelassen. Es versucht daraufhin Ihnen auf unterschiedliche Art und Weise zu signalisieren, dass es vor Ihnen einscheren möchte.

Ihre Aufgabe besteht darin, basierend auf der wahrgenommenen **Fahrstreifenwechselankündigung**, zu entscheiden, ob Sie den Fahrer auf der Nebenspur einscheren lassen möchten oder nicht. Machen Sie dies anhand ihres Fahrverhaltens kenntlich. Bitte beachten Sie die StVO und vermeiden Sie Kollisionen. Nach jedem Spurwechsel des Einscherers würden wir Sie bitten ein paar kurze Fragen zur soeben erlebten Situation zu beantworten bevor das neue Ereignis beginnt.

Falls es Fragen gibt, können Sie sich jederzeit beim Versuchsleiter melden.

Gute Fahrt!

Anhang C4: Handout

Handout

Bitte beantworten Sie nach jeder Situation die folgenden Fragen: Bei der folgenden Skala müssen Sie eine zweistufige Beurteilung abgeben: Entscheiden Sie sich zuerst für eine Verbalkategorie und stufen Sie anschließend mit einer Zahl feiner ab.

Unter „kooperativem und eindeutigem Verhalten“ versteht man in dem Zusammenhang

Eindeutiges Verhalten = *Der Fahrer zeigt seine Absicht deutlich an.*

Kooperatives Verhalten beim Spurwechsel

Der andere Fahrer ist kooperativ: Er geht auf mich ein. Er versucht auf rücksichtsvolle Art und Weise mit mir Kontakt aufzunehmen.

Der andere Fahrer ist nicht kooperativ: Er will seine eigenen Interessen durchsetzen

a. Wie eindeutig hat das Fahrzeug seinen Spurwechselwunsch aufgezeigt?

gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			viel			sehr viel		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

b. Wie bewerten Sie die Kooperationsbereitschaft des Fahrzeuges auf der Nebenspur?

gar nicht	sehr schwach			schwach			mittel			stark			sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

c. Bitte bewerten Sie die Kritikalität der Situation beim Einschervorgang.

Bitte beachten Sie dabei, dass Bewertungen **kleiner 7** für die Fahr- und Verkehrssicherheit in realen Verkehrssituationen noch tolerierbar sind.

Die Situation war

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
	6
unangenehm	5
	4
	3
harmlos	2
	1
nichts bemerkt	0

Anhang C5: Darstellung der Parameterkombination pro Situation.

Situation	Dauer Querversatz [s]	Laterale Position [m]
1	1	0.25
2	2.5	0.5
3	4	0.75
4	1	0.25
5	2.5	0.5
6	4	0.75
7	1	0.25
8	2.5	0.5
9	4	0.75

Anhang D1: Vorfragebogen

Vorfragebogen

Fahrerfahrung

Wie schätzen Sie Ihr eigenes Fahrkönnen ein?

☐ Anfänger ☐ Mittelmäßig ☐ Fortgeschritten ☐ Professionell

Bitte geben Sie Ihre durchschnittliche **jährliche** Fahrleistung an:

☐ 0-5.000km ☐ 5.000-10.000km ☐ 10.000-30.000km ☐ Mehr als 30.000km

Wie lange besitzen Sie bereits den Führerschein?

_____ Jahre

Autonomes Fahren

Wie ist Ihre Einstellung gegenüber autonomen Fahrzeugen: Empfinden Sie diese als...

☐ Begeistert ☐ Eher begeistert ☐ Eher beängstigend ☐ Beängstigend

Ich bin neugierig auf die Verwendung dieser Technologie.

Stimme sehr zu ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Stimme überhaupt nicht zu

Mir fällt es schwer, technischen Geräten zu vertrauen.

Stimme sehr zu ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Stimme überhaupt nicht zu

Situation 1: Sie werden von einem autonom fahrenden Fahrzeug im dichten Berufsverkehr zur Arbeit gefahren.

Wie würden Sie sich dessen Fahrstil wünschen?

zurückhaltend ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ dynamisch

Warum? Beschreibung + Beispiel: _____

Situation 2: Sie fahren im dichten Berufsverkehr mit einem herkömmlichen Fahrzeug, vor Ihnen möchte ein autonomes Fahrzeug einscheren. Wie würden Sie sich den Fahrstil des Einscherers wünschen?

zurückhaltend ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ dynamisch

Warum? Beschreibung + Beispiel: _____

Demografische Fragen

Sie sind...

☐ männlich ☐ weiblich

Geburtsjahr: _____

Anhang D2: Instruktion

Instruktion

In der Studie zum Spurwechselverhalten soll im Rahmen einer Versuchsfahrt das einscherende Fahrzeug bewertet werden.

Sie selbst werden auf dem linken Fahrstreifen mit niedriger Geschwindigkeit von 30 km/h dem vorausfahrenden gelben Mini folgen. Bitte versuchen Sie, den Abstand zum Vordermann in einem für diese Geschwindigkeit üblichen Rahmen zu halten.

Auf dem rechten Fahrstreifen werden sich Kolonnen von **autonomen Fahrzeugen** befinden, welche auf unterschiedliche Art ihren Spurwechselwunsch nach links anzeigen, aber nicht zwangsläufig durchführen. Bitte beachten Sie die StVO und vermeiden Sie Kollisionen, wenn möglich.

Nach jedem Spurwechsel des Einscherers wird die Situation angehalten und ich würde Sie bitten, ein paar kurze Fragen zur soeben erlebten Situation zu beantworten, bevor das neue Ereignis beginnt.

Ihre Aufgabe darin, sich dem Einscherer gegenüber wie im **tatsächlichen Strassenverkehr** zu verhalten.

Vor der tatsächlichen Fahrt wird eine Eingewöhnungsfahrt durchgeführt werden, wobei Sie sich mit dem Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten vertraut machen können.

Falls es Fragen gibt, können Sie sich jederzeit beim Versuchsleiter melden.

Gute Fahrt!

Anhang D3: Handout

Handout

Bitte beantworten Sie nach jeder Situation die folgenden Fragen. Bei der folgenden Skala müssen Sie eine zweistufige Beurteilung abgeben: Entscheiden Sie sich zuerst für eine Verbalkategorie und stufen Sie anschließend mit einer Zahl feiner ab.

Kooperatives Verhalten beim Spurwechsel:

Der andere Fahrer ist **kooperativ**: Er nimmt Kontakt auf und ersucht mich ihn vor mir hineinzulassen.

Der andere Fahrer ist **nicht kooperativ**: Er wechselt, (dennoch unter Einsatz des Blinkers), aber ohne Kontakt aufzunehmen die Spur.

Eindeutiges Verhalten = Der Fahrer weiß was er tun will, nachdem ich verzögert habe

1. Wie eindeutig hat das automatisierte Fahrzeug seine Spurwechselintention angezeigt?

gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			stark			sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

2. Wie kooperativ erschien das automatisierte Fahrzeug?

gar nicht	sehr schwach			wenig			mittel			viel			sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

2. Bitte bewerten Sie die Kritikalität der Situation beim Einschervorgang.

Bitte beachten Sie dabei, dass Bewertungen **kleiner 7** für die Fahr- und Verkehrssicherheit in realen Verkehrssituationen noch tolerierbar sind.

Die Situation war

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
	6
unangenehm	5
	4
	3
harmlos	2
	1
nichts bemerkt	0

Anhang E1: Vorfragebogen

Vorfragebogen

Fahrerfahrung

Wie schätzen Sie Ihr eigenes Fahrkönnen ein?

- ☐ Anfänger ☐ Mittelmäßig ☐ Fortgeschritten ☐ Professionell

Bitte geben Sie Ihre durchschnittliche **jährliche** Fahrleistung an:

- ☐ 0-5.000km ☐ 5.000-10.000km ☐ 10.000-30.000km ☐ Mehr als 30.000km

Wie lange besitzen Sie bereits den Führerschein?

_____ Jahre

Autonomes Fahren

Wie ist Ihre Einstellung gegenüber autonomen Fahrzeugen: Empfinden Sie diese als...

- ☐ Begeistert ☐ Eher begeistert ☐ Eher beängstigend ☐ Beängstigend

Begründung

Ich bin neugierig auf die Verwendung dieser Technologie.

- Stimme sehr zu ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Stimme überhaupt nicht zu

Mir fällt es schwer, technischen Geräten zu vertrauen.

- Stimme sehr zu ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Stimme überhaupt nicht zu

Begründung

Erklärung von autonom

Situation 1: Sie werden von einem autonom fahrenden Fahrzeug im dichten Berufsverkehr zur Arbeit gefahren.

Wie würden Sie sich dessen Fahrstil wünschen?

- zurückhaltend ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ dynamisch

Konkretisierung an einem Beispiel des SW

Situation 2: Sie fahren im dichten Berufsverkehr mit einem herkömmlichen Fahrzeug, vor Ihnen möchte ein autonomes Fahrzeug einscheren. Wie würden Sie sich den Fahrstil des Einscherers wünschen?

- zurückhaltend ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ dynamisch

Konkretisierung an einem Beispiel des SW

Demografische Fragen

Sie sind...

- ☐ männlich ☐ weiblich

Geburtsjahr:

Anhang E2: Instruktion

Instruktion

In dieser Studie soll im Rahmen einer Versuchsfahrt das Spurwechselverhalten betrachtet werden. Dazu soll die Fahrreaktion des Folgefahrzeuges auf der Nebenspur beurteilt werden. Sie selbst werden während des Versuches auf dem rechten Fahrstreifen mit einer niedrigen Geschwindigkeit von 10 km/h dem roten Vorderfahrzeug folgen. Bitte versuchen Sie Ihre Geschwindigkeit von 10 km/h und Ihren damit ihren Abstand zum Vordermann konstant zu halten.

Auf dem linken Fahrstreifen werden sich Kolonnen von **autonomen Fahrzeugen**, mit einer höheren Geschwindigkeit von 30 km/h befinden. Trotz des dichten Verkehrs möchten Sie auf die schnellere Spur wechseln. Nach einer bestimmten Zeit werde ich Sie bitten den Blinker zu setzen um ihren Spurwechselwunsch anzuzeigen und in Abhängigkeit der Reaktion des Fahrers auf der Nebenspur die Spur zu wechseln. Bitte betätigen Sie den Blinker bis Sie die Fahrspurmarkierung überfahren haben. Während des Einschervorgangs können Sie beschleunigen um in die Lücke zu fahren. Falls Sie die Situation als zu kritisch erachten, müssen Sie keinen Spurwechsel durchführen. Bitte beachten Sie dabei die StVO und vermeiden Sie, wenn möglich, Kollisionen. Nach jedem Spurwechsel wird die Situation angehalten und ich würde Sie bitten, ein paar kurze Fragen zur soeben erlebten Situation zu beantworten. Anschließend folgt die nächste Situation.

Vor der tatsächlichen Fahrt wird eine Eingewöhnungsfahrt durchgeführt werden, wobei Sie sich mit dem Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten vertraut machen können.

Falls es Fragen gibt, können Sie sich jederzeit bei mir melden.

Gute Fahrt!

Anhang E3: Handout

Handout

Bitte beantworten Sie nach jeder Situation die folgenden Fragen. Bei der folgenden Skala müssen Sie eine zweistufige Beurteilung abgeben: Entscheiden Sie sich zuerst für eine Verbalkategorie und stufen Sie anschließend mit einer Zahl feiner ab.

Kooperatives Verhalten beim Spurwechsel:

Der Fahrer auf der Nebenspur verhält sich kooperativ, sobald er auf den Spurwechselwunsch des Egofahrzeuges eingeht und diesem durch seine Fahrreaktion den Spurwechsel ermöglicht

Wie eindeutig erschien das automatisierte Fahrzeug auf der Nachbarspur?

gar nicht	sehr wenig			wenig			mittel			stark			sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Wie kooperativ erschien das automatisierte Fahrzeug auf der Nachbarspur?

gar nicht	sehr schwach			wenig			mittel			viel			sehr stark		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

1. Bitte bewerten Sie die Kritikalität der Situation

Bitte beachten Sie dabei, dass Bewertungen **kleiner 7** für die Fahr- und Verkehrssicherheit in realen Verkehrssituationen noch tolerierbar sind.

Die Situation war

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
	6
unangenehm	5
	4
	3
harmlos	2
	1
nichts bemerkt	0

Lebenslauf

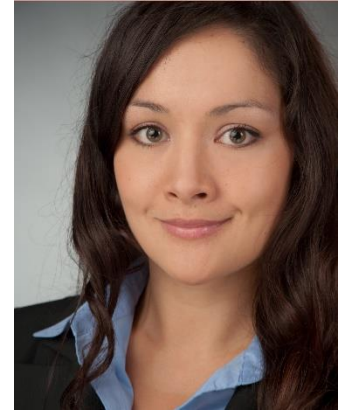
Nina Kauffmann

ninakauffmann@gmx.net • +49 176 420 353 44

Edlingerstr. 1 • 81543 • München

Geboren am 7. März 1986

Staatsbürgerschaft: britisch, österreichisch



Bildungsweg

10/2006 – 12/2012

Universität Wien (Wien, Österreich)

- Fachbereich: Psychologie
- Notendurchschnitt: 1,50
- Abschluss: Diplom

09/2010 – 06/2011

Universidad de Granada (Granada, Spanien)

- Erasmus: Kurse im sozialpsychologischen Bereich

10/2005 – 07/2006

Ludwig-Maximilians-Universität (München, Deutschland)

- Fachbereich: Erziehungswissenschaften

05/2000 – 07/2005

Feodor Lynen Gymnasium (Planegg, Deutschland)

- Leistungskurse: Englisch, Biologie
 - Notendurchschnitt: 2,2
- ⇒ Abschluss: Abitur

Berufserfahrung

11/2015 – heute

BMW Group (München, Deutschland)

Doktorand TU Braunschweig (Fakultät Ingenieurspsychologie)

Thema „Objektivierung von Kooperationsbereitschaft am Beispiel eines Spurwechsels im Niedriggeschwindigkeitsbereich“

01/2015 – 11/2015

BMW Group (München, Deutschland)

Prozessketten-, Bereichsmanagement

- Durchführung der strategischen Planung und Steuerung/Umsetzung der Konzernstrategie
- Qualitätsmanagement
- Management von externen und internen Beziehungen
- Management der Konzernrevision
- Entwicklung und Management von Humankapital
- Informations-, Change-, und Verbesserungsmanagement

04/2014 – 12/2014

Telefónica Deutschland GmbH (München, Deutschland)

HR Consultant

- Beratung und Betreuung von Führungskräften hinsichtlich aller Mitarbeiterbelange (z.B. BEM, Personalentwicklung)
- Wirtschaftsmediation
- Analyse, Anwendung und Optimierung von HR Konzepten und Tools zu Kulturveränderung, Personalentwicklung und Personalführung
- Begleitung von personalrelevanten Veränderungsprozessen (z.B. Umorganisationen)

07/2013 – 04/2014

Bain & Company (München, Deutschland)

Trainee im Bereich HR

- Durchführung von Personalentwicklungsmaßnahmen (Mentoring, Einarbeitung) im Rahmen der Praktikantenbetreuung
- Erstellung und Pflege von Reportings, Statistiken und Auswertungen (Excel)
- Konzeption, Organisation, Durchführung und Nachbearbeitung von Hochschulmarketingaktivitäten spezifischer Zieluniversitäten
- Personalrecruiting und- auswahl

11/2011 – 08/2012

Western Union Bank (Wien, Österreich)**Diplomandin im Bereich Corporate Social Responsibility**

- Untersuchung des Themas „Wahrnehmung von Corporate Citizenship durch die Mitarbeiter: Ein Prädiktor für Commitment im Unternehmen“

06/2011 – 10/2011

HypoVereinsbank (UniCredit) (München, Deutschland)**Praktikantin im Bereich HR**

- Talentmanagement
- Lebenslaufanalyse und Assessment Center Vor- und Nachbereitung
- Aktive Unterstützung bei der Konzeption, Organisation und Durchführung von Workshops und Events für Trainees & Alumni
- Recruiting/Recruitingcontrolling (für Reports)
- Employer Branding

07/2010 – 09/2010

08/2009 – 03/2010

Western Union Bank (Wien, Österreich)**Online Services Administrator**

- Mitarbeit an verschiedenen Projekten im Bereich Prozessoptimierung in Zusammenarbeit mit der Compliance Abteilung (z.B. Optimierung bestehender Tools)
- Überprüfung und Analyse von Kundenprofilen im Sinne der Geldwäscheprävention
- beim internationalen Geldtransfer
- Onlinebetreuung von internationalen Kunden
- Controlling und statistische Datenauswertung (Excel)

03/2010 – 07/2010

Hill International (Wien, Österreich)**Praktikant im Bereich Forschung und Entwicklung**

- Statistische Auswertung von Potential-, Entwicklungs- und psychologischen Daten von Mitarbeitern verschiedener Unternehmen
- Mitarbeit bei Kundenprojekten: Testdiagnostik, -entwicklung und -evaluierung
- Statistische Berechnungen und Ergebnisaufbereitung

Fähigkeiten

IT-Kenntnisse

SPSS; Microsoft Office (sehr gute Kenntnisse)
AMOS, R, Lotus Notes, Oracle, SAP eRecruiting, Visual Xsel, Matlab (Grundkenntnisse)

Sprachen

Deutsch (Muttersprache), Englisch (fließend), Spanisch (Sprachkurs, Level B2)

Interessen

Sport (Fitness-Training), Kochen, Reisen